

**UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE, PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA**

Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užitá geofyziky



**Matematický model proudění podzemní vody v  
českobrodském permokarbonu**

Mathematical model of groundwater flow in the permo - carboniferous  
region of the Český Brod environs

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Bc. Magda Brožová**

Vedoucí: Doc. RNDr. Jiří Mls, CSc.

Praha, květen 2013

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracovala zcela samostatně a všechny převzaté textové a grafické informace řádně ocitovala a důsledně uvedla v seznamu použité literatury. Souhlasím také s využitím této diplomové práce pro studijní a vědecké účely.

V Praze, květen 2013

Bc. Magda Brožová

Podpis .....

## PODĚKOVÁNÍ

Úvodem bych ráda poděkovala vedoucímu mé diplomové práce doc. RNDr. Jiřímu Mlsovi, Csc. za odborné konzultace a věcné připomínky, dále Mgr. Tomáši Ondovčínovi za cenné informace při práci v programech jako jsou ArcGIS, FeFlow a Surfer. Bez jejich úsilí a pomoci by tato diplomová práce jistě nevznikla. Dále bych chtěla poděkovat Českému úřadu zeměměřickému a katastrálnímu za poskytnutá data a mému nadřízenému Jindřichu Valíčkovi za trpělivost a čas věnovaný diskusím o průběhu a způsobu řešení diplomové práce. Chtěla bych poděkovat paní Mgr. Dagmar Pavlíkové, vedoucí oddělení hydrogeologické bilance z ČHMÚ, která mi poskytla informace o pozorovacích vrtech v dané oblasti, dále pak Ing. Heleně Pijálkové (vodohospodářka na MÚ Český Brod), která mi poskytla informace o zdrojích podzemních vod v okolí Českého Brodu, panu Hovorkovi a Mgr. Ing. Barboře Rygerové (Specialista – technolog pitných a odpadních vod) z 1.SčV, kteří mi poskytlí informace o zdrojích podzemních vod, o vlivu těžby na kvalitu podzemních vod a dodali rozborů vod z místních vrtů.

Díky patří také všem zaměstnancům Ústavu hydrogeologie, inženýrské geologie a užité geofyziky PřF UK Praha za jedinečný přístup, předávání cenných rad a za jejich mnohdy velkou dávku trpělivosti a pochopení.

Rovněž děkuji i celé rodině za psychickou a finanční podporu.

## ABSTRAKT

Cílem diplomové práce je celkové zhodnocení hydrogeologických poměrů českobrodského permokarbonu a celkové zhodnocení bilance podzemních vod svrchní zvodně v severní části českobrodského permokarbonu pomocí matematického modelu. Pro realizaci modelu byla využita data ZABAGED poskytnutá Českým úřadem zeměměřickým a katastrálním, který sídlí na Praze 8 v Kobylsích. Matematický model byl vytvořen za pomoci počítačových aplikací jako je FeFlow 5. 2, ArcGIS for Desktop 10. 1 a Surfer 10. 7. 972.

Výsledkem této práce je zhodnocení celkové bilance srážkových, povrchových a podzemních vod svrchní zvodně v severní části českobrodského permokarbonu, respektive v oblasti hydrologického povodí Horního a středního Labe, hydrologického povodí 4. řádu řeky Výrovky (HEIS.VUV.cz). Zhodnocení bylo provedeno na základě srovnání dat získaných z prostudovaných posudků a na základě dat získaných výpočtem z matematického modelu. Výsledky matematického modelu byly rovněž porovnány s původním modelem hydroizohyps, který byl vytvořen na základě souřadnic jednotlivých vrtů na daném území a výšek ustálených hladin podzemní vody, souřadnic a výšek hladin vybraných bodů na jednotlivých vodotečích. Před dokončením matematického modelu v programu FeFlow byl

tento model jedinou informací o proudění podzemní vody ve svrchní zvodni zájmového území.

## **ABSTRACT**

The aim of this thesis is an overall assessment of the hydrogeological conditions of the Český Brod Permian Carboniferous and overall the balance of upper groundwater aquifer in the northern part of the Český Brod Permian Carboniferous using a mathematical model. For the realization of the model was used ZABAGED data provided by the Czech Office for Surveying, Mapping and Cadastre, which is located in Prague 8 Kobylsích. The mathematical model was created using computer applications such as FeFlow 5. 2,

ArcGIS for Desktop 10. 1 and Surfer 10. 7. 972.

The result of this work is to evaluate the overall balance of precipitation, surface water and groundwater in the upper aquifer north of Český Brod Permian Carboniferous, respectively, in the hydrologic basin of the Upper and Middle Elbe, in the hydrological basin fourth Order river Vyrovka (HEIS.VUV.cz). The evaluation was done by comparing the data obtained from the studied opinions and based on data obtained from calculations of the mathematical model. The results of the mathematical model were also compared with the original model hydroizohyps, which was created based on the coordinates of the individual wells in a given area and treble steady groundwater levels, coordinate and treble levels of selected points on each watercourse. Before completing the mathematical model in the FeFlow this model only information about groundwater flow in the upper aquifer of the area.

## OBSAH:

<b>KAPITOLA 1. ÚVOD.....</b>	<b>8</b>
1.1. Metodika diplomové práce .....	8
1.2. Uspořádání diplomové práce.....	8
<b>KAPITOLA 2. ZÁJMOVÉ ÚZEMÍ.....</b>	<b>9</b>
2.1. Pozice a geomorfologické vyčlenění českobrodského permokarbonu .....	9
2.2. Geologický přehled.....	10
2.2.1. Výskyt českobrodského permokarbonu v blanickém příkopu.....	10
2.2.2. Geologické vrstvy českobrodského permokarbonu .....	10
2.2.3. Strukturně tektonický výskyt (podle Peška et al., 2001).....	13
<b>KAPITOLA 3. HYDROGEOLOGIE.....</b>	<b>14</b>
3.1. Dosavadní hydrogeologická prozkoumanost .....	14
3.2. Charakteristika hydrogeologického prostředí .....	15
3.2.1. Zvodněné systémy, hydrogeologické kolektory a izolátory (Krásný et al., 1982) ...	15
3.2.2. Hydraulické vlastnosti hornin .....	18
3.2.3. Režim a proudění podzemní vody, přírodní zdroje.....	19
3.2.4. Výskyt minerálních vod typu solanky (chloridové vody).....	21
3.3. Praktické aspekty.....	21
<b>KAPITOLA 4. MATEMATICKÝ MODEL.....</b>	<b>24</b>
4.1. Základní dělení matematických modelů .....	25
4.2. Numerické metody .....	27
4.2.1. Metoda konečných diferencí.....	27
4.2.2. Metoda konečných prvků.....	27
4.2.3. Okrajové a počáteční podmínky .....	29
4.3. Vstupní podklady pro matematický model .....	30
4.3.1. Údaje z HG/IG vrtů.....	30
4.3.2. Hydroizohypsy .....	31
4.3.3. Vymezení modelované oblasti .....	33
4.3.4. Hydraulické parametry .....	34
<b>KAPITOLA 5. TVORBA 3D MODELU VE FEFLOW 5.2.....</b>	<b>35</b>
5.1. Zjednodušení vstupních dat v ArcGIS for Desktop 10. 1 .....	36

5.2. Koncepční model.....	37
5.2.1. <i>Definice oblasti</i> .....	37
5.2.2. <i>Hydraulické parametry oblasti</i> .....	37
5.3. Vlastní práce ve FeFlow 5.2.....	38
5.3.1. <i>Tvorba polygonu</i> .....	38
5.3.2. <i>Tvorba sítě</i> .....	39
5.3.3. <i>Tvorba jednotlivých vrstev</i> .....	41
5.3.4. <i>Zadání okrajových podmínek</i> .....	42
5.3.5. <i>Simulace – řešení diskretizované úlohy</i> .....	45
<b>KAPITOLA 6. ZÁVĚR.....</b>	<b>46</b>
6.1. Postup práce .....	47
6.2. Výsledky .....	47
6.3. Diskuse.....	50
6.4. Závěr .....	51
6.4.1. <i>Obecné zhodnocení hydrogeologie dané oblasti</i> .....	51
6.4.2. <i>Zhodnocení celkové bilance</i> .....	51
6.4.3. <i>Srovnání modelů hydroizohyps</i> .....	53
6.4.4. <i>Využití podzemních vod v českobrodském permokarbonu (Český Brod a okolí)</i> ....	54
6.4.5. <i>Zásady ochrany podzemních vod</i> .....	54
<b>KAPITOLA 7. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>55</b>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Základní členění kontinentálního permokarbonu v České republice	9
Obrázek 2: Geologická mapa permokarbonu blanické brázdy	11
Obrázek 3: Schematický řez s. částí českobrodského výskytu j. od Českého Brodu	13
Obrázek 4: Schematický řez permokarbonem chýnovského výskytu	14
Obrázek 5: Hydrogeologické rajóny	16
Obrázek 6: Relativní kumulativní četnosti indexu transmisivity Y souboru vrtů a studní, vymezených v českobrodském permokarbonu	18
Obrázek 7: Místa odběrů podzemních vod a geologické celky, v jejichž rámci byly počítány průměrné obsahy a variabilita hlavních složek v podzemních vodách	20
Obrázek 8: Rozbor vody ze studny v obci Doubravčice. 1.SčV (1988).	23
Obrázek 9: Rozbor vody. 1.SčV (2004). Upraveno.	24
Obrázek 10: Schéma mapy hydroizohyps od Sázavy ke Kouřimi	31
Obrázek 11: Schéma mapy hydroizohyps od Kouřimi ke Kounici	32
Obrázek 12: Schéma mapy hydroizohyps jako průnik dvou oblastí	33
Obrázek 13: Schéma vymezení oblasti dle modelu hydroizohyps a vodotečí	34
Obrázek 14: Schéma podkladových dat do Feflow 5.2	36
Obrázek 15: Schéma finálního rozsahu oblasti	39
Obrázek 16: Schéma výsledné trojúhelníkové sítě oblasti	41
Obrázek 17: Schéma Dirichletovy okrajové podmínky ve svrchní vrstvě oblasti	43
Obrázek 18: Schéma rozložení hydraulických vodivostí hornin	44
Obrázek 19: Schéma rozložení průměrných ročních srážek	45
Obrázek 20: Schéma výsledné simulace proudění podzemní vody	48
Obrázek 21: Schéma mapy hydroizohyps vypočtených v aplikaci FeFlow 5. 2	49
Obrázek 22: Schéma mapy hydroizohyps vypočtených v aplikaci FeFlow a upravených v aplikaci Surfer	49
Obrázek 23: Schéma lokálně zadaných srážek	50
Obrázek 24: Výpočet bilance veškerých vod v modelu	52
Obrázek 25: Výpočet podzemního odtoku z hydrologického povodí v severním cípu modelované oblasti	53

## KAPITOLA 1. ÚVOD

### 1.1. Metodika diplomové práce

Cílem diplomové práce je celkové zhodnocení hydrogeologických poměrů českobrodského permokarbonu a celkové zhodnocení bilance podzemních vod svrchní zvodně v severní části českobrodského permokarbonu pomocí matematického modelu. Pro realizaci modelu byla použita data ZABAGED poskytnutá Českým úřadem zeměměřičským a katastrálním. Matematický model byl vytvořen za pomoci softwarů FeFlow 5. 2, ArcGIS for Desktop 10. 1 a Surfer 10. 7. 972. Práce je založena na studiu dostupné publikované a archivní literatury (mj. Pešek et al. 2001, Krásný et al. 1982) a dále na aktualizaci v terénu (MÚ Český Brod, ČHMÚ, 1.SčV, a. s.).

### 1.2. Uspořádání diplomové práce

Předkládaná diplomová práce je členěna celkem do sedmi kapitol. Kapitola první je věnována obecnému úvodu do řešené problematiky. Dále následují podkapitoly, které se věnují metodice diplomové práce a jejímu uspořádání.

Kapitoly 2 a 3 pak představují části rešeršní. Kapitola 2 hovoří o lokalitě zájmového území, tedy o území výskytu českobrodského permokarbonu. Jsou zde shrnuty základní informace týkající se geomorfologie, geologie a tektoniky zájmového území. Dále v kapitole 3 se pojednává o podrobné hydrogeologické situaci na daném území, jako je dosavadní hydrogeologická prozkoumanost, charakteristika hydrogeologického prostředí, hydraulické vlastnosti hornin charakterizující dané prostředí, režim a proudění podzemní vody, přírodní zdroje podzemních vod.

Kapitola 4 pojednává o numerických metodách, okrajových a počátečních podmínkách a zároveň shrnuje vstupní podklady pro vlastní řešení matematického modelu proudění podzemní vody. Především jsou zde shrnuty údaje z geologických, hydrogeologických vrtů a hydraulické parametry hornin. Na jejich základě jsou vytvořeny modely hydroizohyps, dle kterých je následně vymezena modelovaná oblast.

Kapitola 5 je věnována vlastnímu postupu při matematickém modelování proudění podzemní vody svrchní zvodně v softwaru FeFlow 5. 2. Je zde probrán postup jak nadefinovat polygon dané oblasti, jak vytvořit geometrickou síť pro danou oblast a jak zadat hydraulické parametry a okrajové podmínky. V závěru kapitoly je popsán průběh simulace vlastního výpočtu dané oblasti.

V kapitole 6 jsou pak diskutovány výsledky diplomové práce a vlastní závěr. V kapitole 7 jsou shrnuty zdroje literatury, z nichž se při tvorbě diplomové práce čerpalo. Také jsou zde uvedeny internetové zdroje a seznam vytvořených příloh.

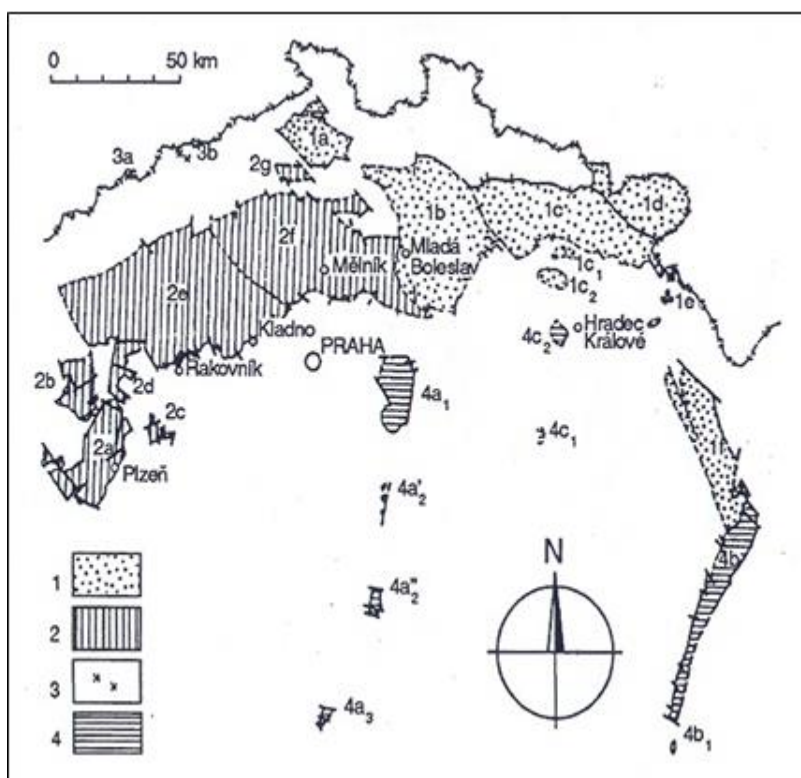


## KAPITOLA 2. ZÁJMOVÉ ÚZEMÍ

### 2.1. Pozice a geomorfologické vyčlenění českobrodského permokarbonu

Českobrodský permokarbon je jedním z mnoha svrchnopaleozoických výskytů v Českém masivu (obr. 1). Tvoří nejsevernější a největší z relikтів, které se zachovaly v prostoru blanického příkopu, dříve označovaného jako blanická brázda (obr. 2).

Českobrodský permokarbon se nachází cca 35 až 40 km na východ od Prahy, reliéf celé oblasti je převážně plochý (Krásný et al., 1982). Českobrodský permokarbon spadá do klimatické oblasti s označením A – teplá oblast: A3 – okresek teplý, mírně suchý s mírnou zimou. Průměrné dlouhodobé měsíční a roční teploty vzduchu (°C) v letech 1931 - 1960 kolísají mezi 8,2 a 8,9 °C. Průměrné měsíční a roční úhrny srážek (mm) v letech 1931 – 1960 se pohybují mezi 580 a 600 mm. Území se nachází mezi dvěma významnými toky. Na severu je to řeka Labe, tvořící osu povrchové vodní sítě; jako dolní erozní báze představuje Labe rovněž osu drenáže podzemních vod většiny území a na jihozápadě řeka Sázava.



**Obrázek 1: Základní členění kontinentálního permokarbonu v České republice**

Sine (1992), upraveno.

#### Legenda:

1 – sudetské svrchní paleozoikum, pánev: a – českokamenická, b – mnichovohradištská, c – podkrkonošská (c<sub>1</sub> – výskyt u Zvičiny, c<sub>2</sub> – výskyt na hořickém hřbetu), d – vnitrosudetská, e – výskyt permu v Orlických horách, f – orlická;

2 – západočeské a středočeské svrchní paleozoikum, pánev: a – plzeňská, b – manětínská, c – radnická, d – žihelská, e – kladenskorakovnická, f – mšensko-roudnická;

3 – krušehorské svrchní paleozoikum: a – výskyt u Brandova, b – výskyt mezi Moldavou a Teplicemi v Čechách;

4 – svrchní paleozoikum brázd, brázda:

a – blanická část (a<sub>1</sub> – severní (Českobrodsko), a<sub>2</sub> – střední: a<sub>2</sub>' – Vlašimsko, a<sub>2</sub>'' – Tábořsko, a<sub>3</sub> – jižní (Českobudějovicko)), b – boskovická (b<sub>1</sub> – výskyt u Miroslavi), c – jihlavská (c<sub>1</sub> – výskyt v Železných horách, c<sub>2</sub> – výskyt u Hradce Králové).

## **2.2. Geologický přehled**

Území leží v centrální části Českého masívu. V jeho jižní části vystupují krystalinické a zčásti proterozoické a staropaleozoické horniny, v severní části jsou překryté mladopaleozoickými a hlavně svrchnokřídovými sedimenty. Nejmladšími hydrogeologicky významnými uloženinami jsou kvartérní fluviální sedimenty, které sledují zejména tok Labe. Horniny permu a karbonu, vycházející na povrch, tvoří jednak výplň blanického příkopu, jednak drobné výskyty v Železných horách a na hořickém hřbetu. Větší část permokarbonských sedimentů je skryta v podloží křídý. Z původně souvislé permokarbonské výplně blanického příkopu zůstaly jen izolované zbytky, z nichž největší je českobrodský permokarbon. Tvoří na východě tektonicky omezenou, severojižním směrem od Kounic a Poříčan k Stříbrné Skalici protaženou brachysynklinálu, o mocnosti přesahující 695 m (vrt v Přistoupimi nedosáhl podloží). Sedimenty zastoupené převážně slepenci, pískovci, prachovci a jílovci, místy s vápencovými a uhelnými polohami, jsou stefanského až spodnoautunského stáří (Krásný et al., 1982). Sedimenty blanického příkopu rozčlenil Holub (1972 a 1982) do dvou souvrství – černokosteleckého a českobrodského. Další relikt, zachované v prostoru blanického příkopu, jsou znázorněny na obr. 2.

### ***2.2.1. Výskyt českobrodského permokarbonu v blanickém příkopu***

Českobrodský permokarbon je tvořen z části černokosteleckým souvrstvím a z části souvrstvím českobrodským. Černokostelecké souvrství, stáří stephan C až spodní autun, je bazální jednotkou výplně blanického příkopu. Ukládalo se po intrastefanském hiátu, s nímž byly spjaty významné změny jak v pánvích, tak ve snosných územích.

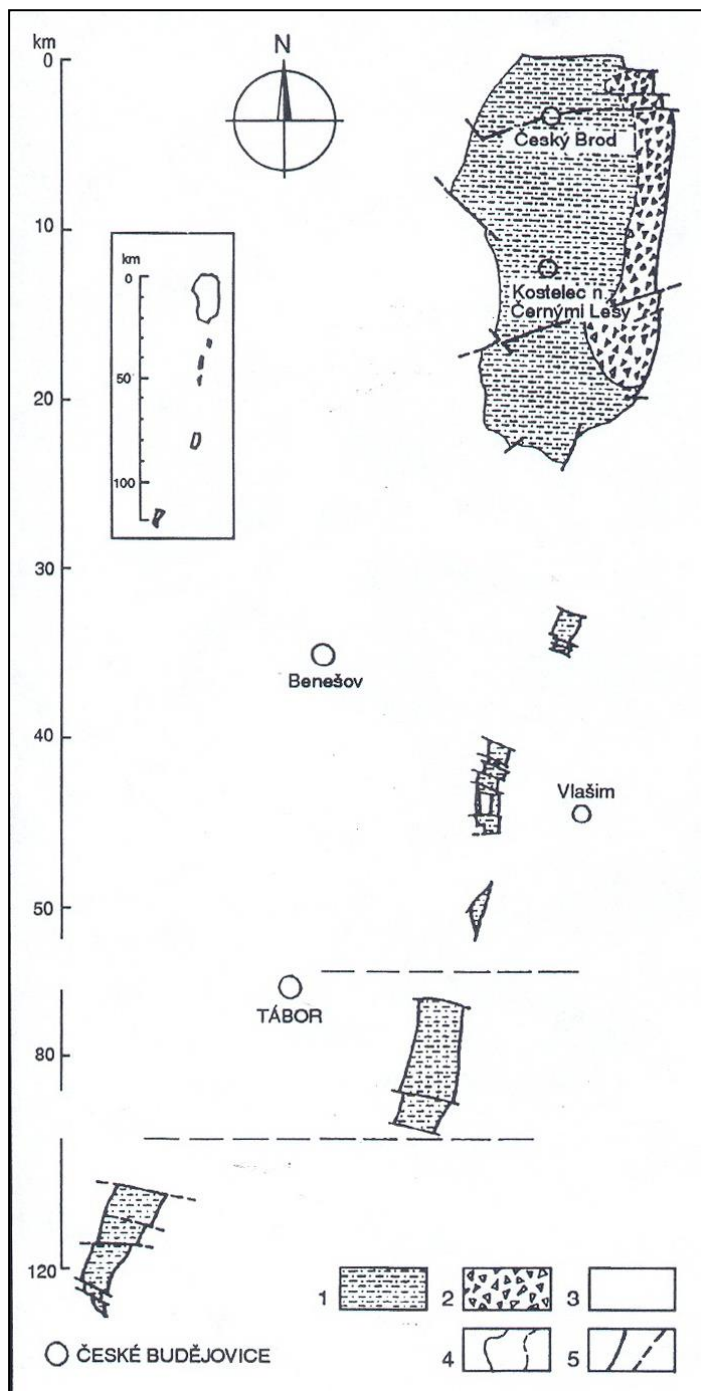
### ***2.2.2. Geologické vrstvy českobrodského permokarbonu***

Peklovské vrstvy (stephan C) jsou komplexem klastik, který je znám z výskytů hlavně u Českého Brodu. Tato jednotka je na Českobrodsku mocná 100 až 275 m. Vrstvy jsou tvořeny nejčastěji šedými, šedohnědými, načervenalými až nazelenalými pískovci, arkózovitými pískovci, arkózami, drobnozrnnými až středozrnnými slepenci. Vložky v nich tvoří aleuropelity zelenošedé a šedé barvy. Z hlediska paleogeografie se peklovské vrstvy ukládaly v izolovaných depresích, v podmínkách výrazně rozdílné subsidence, patrně na velmi nerovném podloží. Valnou část peklovských vrstev reprezentují sedimenty proluviální, říční, jezerně deltové, řidčeji i jezerní.

Lhotické vrstvy, řazené do spodního autunu, mají mocnost 50 až 175 m. Z pravidla jsou tvořeny při bázi šedými a načervenalými jemnozrnnými pískovci a aleuropelity. Svrchní část lhotických vrstev reprezentují červené pískovce, arkózovité pískovce, arkózy až droby a

aleuropelity s vložkami paleokarbonátů, bitumenních vápenců a jílovců. Lhotické vrstvy se ukládaly na podstatně větším území než předchozí jednotka. Vyvíjí se bez přerušení z podložních vrstev peklovských. Sedimentační prostředí, v němž se tyto vrstvy ukládaly, se příliš neodlišuje od předchozí jednotky.

Českobrodské souvrství, stáří svrchní části spodního autunu a možná i autunu svrchního, vyplňuje větší část území tvořeného výskyty permokarbonu blanického příkopu. Dělí se do dvou vrstevních jednotek, z nichž chýnovské vrstvy tvoří převážnou část výplně všech výskytů blanického příkopu (Pešek et al., 2001).



**Obrázek 2: Geologická mapa permokarbonu blanické brázdy**

V. Holub (1999)

**Legenda:**

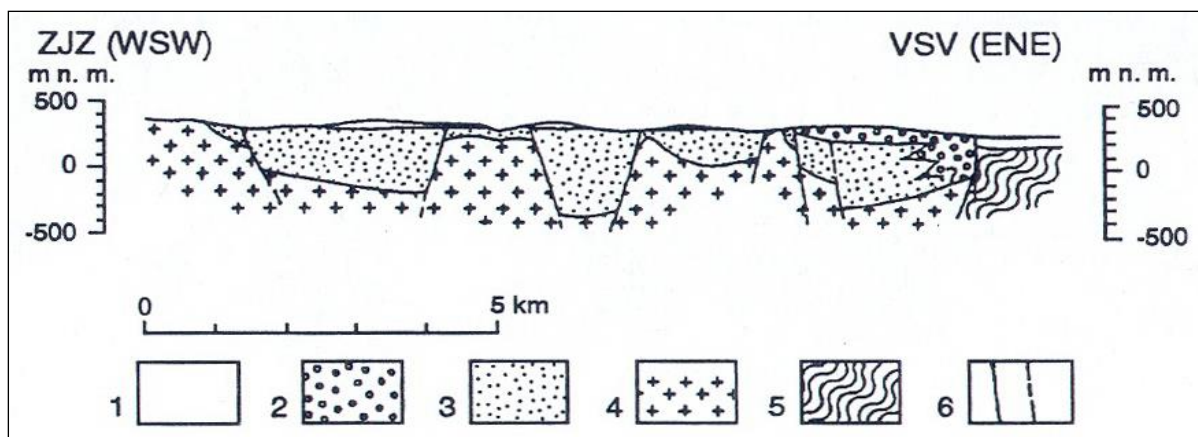
- 1 – černokostelecké souvrství (vrstvy peklovské a lhotické) a spodní část souvrství českobrodského (vrstvy chýnovské);
- 2 – českobrodské souvrství (svrchní část – vrstvy bulánské);
- 3 – krystalinická hrást uvnitř permokarbonského výskytu;
- 4 – hranice permokarbonu (známá a předpokládaná);
- 5 – zlom (zjištěný a předpokládaný).

Chýnovské vrstvy, které patrně náležejí do svrchní části spodního autunu, jsou nejmocnější, až 300 – 500 m mocnou permokarbonskou jednotkou v blanickém příkopu, přičemž nelze vyloučit, že na Českobrodsku je mocnost těchto vrstev ještě větší. Litologicky jde o monotónní komplex rytmicky se střídajících dvoučlenných cyklů psamitů a aleuropelitů. Psamity jsou reprezentovány světle šedými či načervenalými slídnatými pískovci, arkózovitými pískovci, arkózami a slepenci, aleuropelity a jílovci s vložkami deskovitých vápenců (Český Brod). Dále se vyskytují světle pastelově pestře zbarvené slínovce s polohami s vápnitými konkréciemi a řidce se vyskytujícími šedými deskovitými bitumenními vápenci, jako u Českého Brodu.

Z hlediska paleogeografie se uloženi chýnovských vrstev většinou vyvíjejí plynule z vrstev lhotických. Reprezentují období plošně největší a patrně také nejdelší sedimentace. Z charakteru depozit je zřejmé, že nedošlo k podstatné změně prostředí, tj. převažují uloženi řek a jezerních delt. V období vlhčího klimatu se ukládaly karbonáty a slínovce, nevznikly však žádné uhelné sloje.

Nejmłodší vrstevní jednotkou, považovanou Holubem (1972) za spodní, zčásti eventuálně též za svrchní autum, jsou vrstvy bulánské. Jsou známy také jako bulánská brekcie. Vyskytují se pouze v severním dílu příkopu při jeho východním okraji v okolí Českého Brodu a Kostelce nad Černými Lesy (obr. 3). Slepence a brekcie s nevytříděnou matrix tvoří převážně okrajovou facií, ve které převládajícím klastickým materiálem je kouřimská ortorula. Někteří autoři (např. Havlena, 1964) považují bulánské vrstvy za heteropickou facií vrstev chýnovských. Mocnost této jednotky lze pouze odhadovat na maximálně 200 až 300 m.

Z hlediska paleogeografie jsou bulánské vrstvy typickým produktem proluviální sedimentace. Hrubá klastika této jednotky lemuji západní okraj relativně stoupajícího zdrojového území. Zčásti leží v nadloží chýnovských vrstev, zčásti jsou facií předchozích jednotek (obr. 2 a 3). Původní rozsah sedimentů této jednotky byl nepochybně větší, musel však být redukován ještě před ukládáním svrchnokřídových sedimentů. Nelze vyloučit, že uloženi permokarbonu blanického příkopu mohly v určitém časovém úseku komunikovat s výplní mnichovohradišťské pánve (Pešek et al., 2001).



**Obrázek 3: Schematický řez s. částí českobrodského výskytu j. od Českého Brodu**

V. Holub (1972), upraveno.

**Legenda:**

- 1 – svrchní křída; 2 – 3 svrchní stephan až autun – vrstvy: 2 – bulánské; 3 – chýnovské, lhotické a peklovské;  
4 – granitoidy středočeského plutonu; 5 – kutnohorské krystalinikum; 6 – zlom zjištěný a předpokládaný.

### **2.2.3. Strukturně tektonický výskyt (podle Peška et al., 2001)**

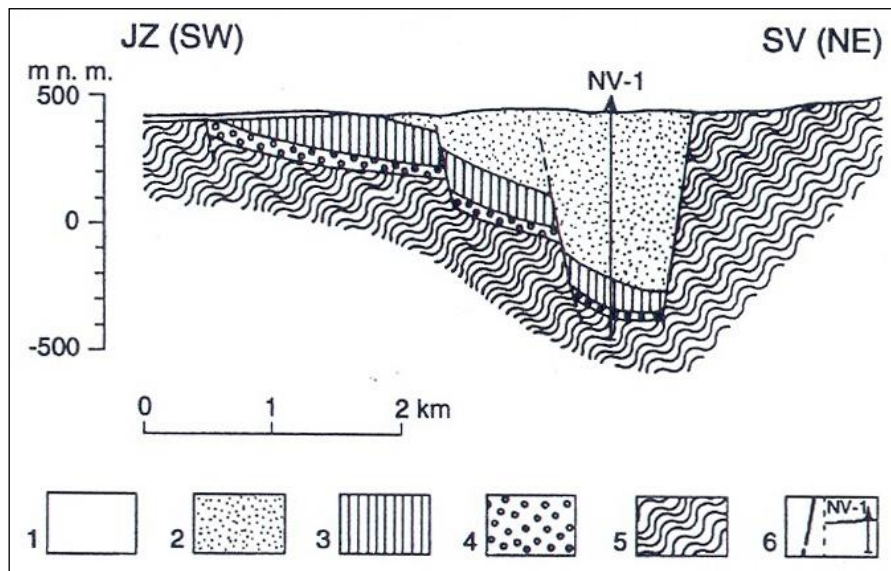
Svrchnopaleozoické výskytů tvoří v blanickém příkopu několik výskytů permokarbonu seřazených v pruhu severoseverovýchod – jihojihozápadního směru. Tato asymetrická struktura vznikla na presedimentárně založené linii diskontinuity, oživené během intrastephanské fáze hercynské orogeneze, která byla aktivní i postsedimentárně. Její osa subsidence leží zpravidla při východním okraji svrchnopaleozoických výskytů. Ty jsou tektonicky omezeny buď jednostranně (českobrodský výskyt na východě) nebo převážně oboustranně. Rozsah některých permokarbonských výskytů vymezují také zlomy při jejich severním a jižním okraji (obr. 3, 4).

Sedimenty permokarbonu blanického příkopu jsou zpravidla ukloněny k východu (s rozptylem severovýchod až jihojihozápad) pod úhlem 10 – 40°. Vedle zlomů směru SSV – JJZ, ojediněle se stáčejících až do směru SSZ – JJV, se vyskytují i zlomy směru V – Z až SZ – JV. Chronologii pohybů vymezuje Holub (1972) takto:

- vytvoření labilní zóny SSV - JJZ směru před začátkem svrchnopaleozoické sedimentace;
- synsedimentární aktivita zlomů výše zmíněného směru;
- vznik zlomů směru V – Z s rozptylem do směrů SV – JZ až SZ – JV, které umožnily vznik příčných depresí;
- opakování pohybů na zlomech SSV – JJZ směru;
- opakování pohybů na zlomech směru V – Z.

Jde převážně o poklesy, zčásti o příčné a kosé horizontální posuny.

Východní část území je po tektonické stránce charakterizována zejména kouřimským zlomem severojižního směru, který se nachází cca 1 km od vodního toku Bylanky. Tento nejsevernější projev tektoniky blanického příkopu odděluje k jihu vybíhající pruh zapadlých křídových sedimentů východně od vyzdvižené kry českobrodského permokarbonu se zachovanými denudačními zbytky křídý. Pokračování kouřimského zlomu k severu dále do české křídové pánve nebylo prokázáno (Krásný, 2012).



**Obrázek 4: Schematický řez permokarbonem chýnovského výskytu**

V. Holub (1967)

**Legenda:**

- 1 – terciér; 2 – 4 svrchní stephan až autun – vrstvy: 2 – chýnovské; 3 – lhotické; 4 – peklovské;  
5 – moldanubické krystalinikum; 6 – v levé polovině vysvětlivky zlom, vpravo vrt do podloží.

## KAPITOLA 3. HYDROGEOLOGIE

### 3.1. Dosavadní hydrogeologická prozkoumanost

Prozkoumanost českobrodského permokarbonu lze považovat za poměrně rovnoměrnou a dostatečnou ve svrchních partiích většiny území. Příklady uměle vytvořených hydrogeologicky významných objektů poskytující hydrogeologické údaje, které charakterizují dané prostředí, jsou znázorněny na obr. 7. Vrtý, které by umožňovaly hydrogeologicky charakterizovat hlubší partie (zhruba pod 100 m) však úplně chybějí (Krásný et al., 1982).

Na základě informací Mgr. Dagmar Pavlíkové (ČHMÚ) se na zájmovém území v blízkosti Českého Brodu nacházejí dva pozorovací vrty pro sledování hladin a jakosti podzemních vod. V této lokalitě také nedávno realizovali další dva průzkumné vrty (Ing. Helena Pijálková – MÚ Český Brod), z nichž jeden by mohl být v budoucnosti využíván jako zásobárna podzemní vody. Z nedostatku financí na vodovodní přivaděč jsou vrty utěsněny a zatím nebyly nahlášeny v databázi.

### **3.2. Charakteristika hydrogeologického prostředí**

Českobrodský permokarbon na základě charakteristiky hydrogeologického prostředí patří do hydrogeologického celku I. řádu a nazývá se pánevní zvodněný systém (Krásný et al., 1982). Tento systém je tvořen karbonskými, permskými a křídovými sedimenty, místy překrytými fluviálními kvartérními uloženinami (česká pánev).

Pro přípravu a provádění prací v oboru hydrogeologického výzkumu a průzkumu, oceňování a vedení evidence využitelných zdrojů podzemní vody byly vymezeny rajóny, jejichž označení, názvy a rozsah podle Směrnice pro sestavení základní hydrogeologické mapy ČSSR jsou uvedeny v obrázku 5.

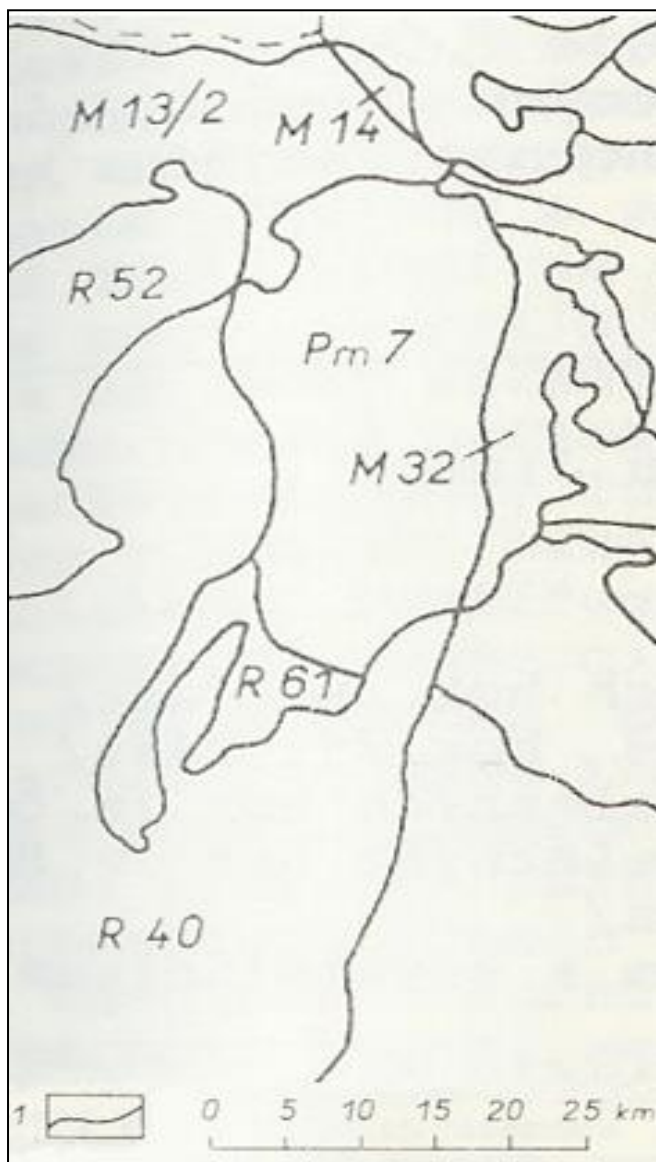
#### ***3.2.1. Zvodněné systémy, hydrogeologické kolektory a izolátory (Krásný et al., 1982)***

Zvodněný systém je prostorový hydrogeologický celek (vzájemně propojená soustava zvodněných kolektorů) s charakteristickým vnitřním uspořádáním (mikrostruktury a makrostruktury) omezený hranicemi s určitými okrajovými podmínkami (definice upravena podle Margata – Monitiona 1968 a Jetela 1978). Hydrogeologickým kolektorem je horninové těleso výrazně propustnější než horniny v jeho okolí, zatímco hydrogeologický izolátor je tvořen horninami s výrazně menší propustností než okolní horninové prostředí (Jetel 1978).

Česká pánev je více kolektorovým zvodněným systémem; v závislosti na litologickém vývoji sedimentů zde existuje větší počet regionálně vymezených kolektorů, na něž jsou vázány v různém stupni spolu vzájemně hydraulicky související zvodně. V nejsvrchnější části pánevní výplně se vyskytují spojitě průlinově propustné kolektory (kvartérní fluviální štěrkopísky) a průlinově – puklinově propustné kolektory (např. středoturonské pískovce a vápnité pískovce v severozápadní části území), ve velké části území je však možno za svrchní kolektor považovat pouze zónu zvětralin a přípovrchového rozpojení puklin (turonské a coniacké slínovce a slínité jílovce labské oblasti nebo permokarbonské sedimenty); hlouběji plní zmíněné turonské a coniacké sedimenty funkci regionálního hydrogeologického izolátoru v nadloží bazálního křídového kolektoru. Bazální křídový kolektor, rozšířený ve velké části křídové pánve, je tvořen cenomanskými pískovci; někdy přesahuje vertikální rozsah propustnějších hornin cenoman a do bazálního křídového kolektoru pak kromě cenomanu



zahrnuje i propustné rozpukané partie podložního proterozoika nebo staršího paleozoika. V některých územích výskytu permokarbonských hornin v podloží křídý bylo vymezeno větší množství komplexů s funkcí převážně buď kolektorů, nebo izolátorů.



**Obrázek 5: Hydrogeologické rajóny**

Krásný et al. (1982), upraveno.

**Legenda:**

- 1 – hranice hydrogeologického rajónu;
- PM7 - mladší paleozoikum v oblasti Českého Brodu a Kostelce nad Černými lesy;
- M13/2 - okrajová část křídý východně od Prahy;
- M14 - centrální část české křídové pánve;
- M32 - svrchní křída Čáslavské kotliny na západní straně Železných hor;
- R40 - střeodočeský pluton;
- R52 - svrchní proterozoikum a starší paleozoikum v oblasti tepelsko-barrandienské;
- R61 - kontaktně metamorfované algonkium ostrovní zóny mezi Čerčany, Stříbrnou Skalicí a Chocerady;

Pro permokarbonské sedimenty je charakteristický všeobecný pokles propustnosti a porózy směrem do hloubky (Jetel, 1974). Obdobný charakter hlubších partií permokarbonských hornin lze očekávat i v dalších územích (českobrodský permokarbon). V permokarbonských sedimentech vycházejících na povrch je zvýšená propustnost většinou omezena na zónu zvětralin a přípovrchového rozpojení puklin, jejíž maximální mocnost lze na základě výsledků z jiných permokarbonských oblastí odhadovat do 40 – 60 m (Krásný, 1976). Charakter proudění podzemních vod závisí zejména na geometrii a propustnosti kolektorů, jejich vzájemném vztahu, míře netěsnosti izolátorů a pozici kolektorů vůči erozní bázi. Na



jednotlivé kolektory jsou vázány zvodně – hydraulicky souvislé jednotné akumulace gravitační podzemní vody. Z hlediska významných rysů proudění podzemních vod lze vymezit dvě základní skupiny zvodní, spoluvytvářejících v některých případech jednoduché, jindy složité zvodněné systémy:

- a) skupina svrchních zvodní
- b) skupina spodních zvodní

Skupina svrchních zvodní je vázána na různé kolektory, většinou nepřekryté regionálně rozšířenými izolátory; k infiltraci proto dochází převážně v celé ploše zemních vod s drenáží v úrovni nebo nad úrovní místních erozních bází. Hladina je vesměs volná nebo mírně napjatá. Do této skupiny náleží svrchní zvodeň s.s., vázaná na pásmo zvětralin a přípovrchového rozpojení puklin různých hornin, dále středoturonská zvodeň, kvartérní zvodeň, vázaná na fluvialní štěrkopískové náplavy atd. Skupina svrchních zvodní rozhodující měrou ovlivňuje výši odtoku podzemní vody.

Skupina spodních zvodní zahrnuje vesměs napjaté zvodně, vázané především na hlouběji uložené kolektory cenomanu (bazální křídová zvodeň), permokarbonu (zejména v podloží křídý) a dále eventuální zvodně v krystaliniku. Specifickými vlastnostmi těchto zvodní jsou obvykle omezená infiltrace, proudění většího plošného a hloubkového dosahu (obvykle zpomalené) a zvláštní fyzikálně chemický charakter podzemních vod.

Pokud přijmeme běžné zevšeobecňující schéma vertikální hydrodynamické zonálnosti, lze skupinu svrchních zvodní přiřadit převážně k:

- zóně intenzivního proudění podzemních vod
- zóně zpomaleného proudění podzemních vod, která je většinou reprezentována bazální křídovou zvodní

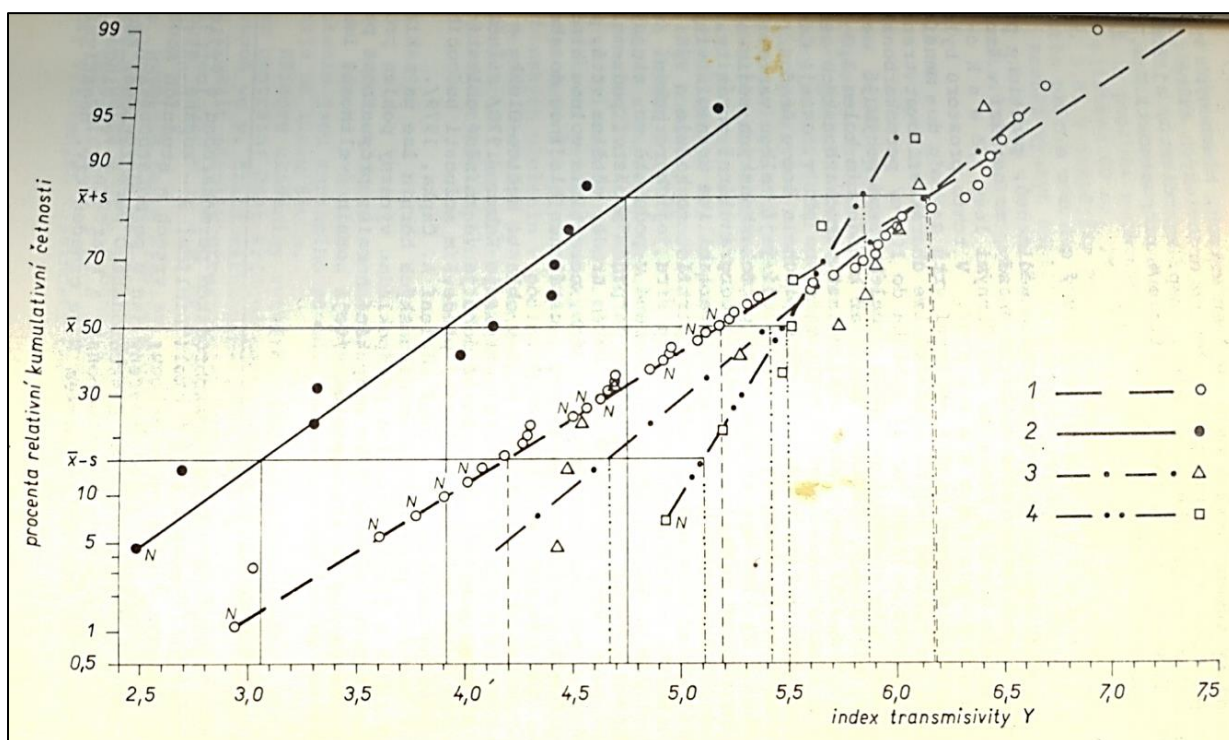
Zóně velmi pomalého proudění až stagnace podzemních vod lze přiřadit hluboké permokarbonské zvodně, popř. žilné zvodně prevariských sedimentů a vyvřelin (Krásný et al., 1982).

Uvedené schéma vertikální hydrodynamické zonálnosti lze paralelizovat s regionálním hydrogeochemickým schématem, které odvodil pro českou pánev Jetel (1970): zóna intenzivního proudění a většinou i zóna zpomaleného proudění podzemních vod odpovídá svrchní (hydrokarbonátové) hydrogeochemické zóně s převahou hydrokarbonátů nad chloridy, zatímco zóna velmi pomalého proudění až stagnace podzemních vod se zhruba kryje se spodní (chloridovou) hydrogeochemickou zónou charakteristickou převahou chloridů nad hydrokarbonáty (Krásný et al., 1982; Krásný, 2007). Podrobnějším popisem vertikální hydrogeochemické zonálnosti permokarbonu se zabýval Jetel (1970), který na základě

analýzy 138 vodních vzorků z různých hloubek vrtů, rozdělil permokarbon do hydrogeochemických pásem. Rozdělení bylo založeno na poměru převládajících anionů (C, S, Cl) a kationů (Ca, Mg, Na) v podzemní vodě. Na základě těchto poměrů bylo stanoveno několik typů podzemní vody (I, II, IIIa, III, IV).

### 3.2.2. Hydraulické vlastnosti hornin

Hydraulické vlastnosti hornin, které uvádí Pešek (2001) v českobrodském výskytu, lze na základě provedených vrtů charakterizovat transmisivitou nejsvrchnějších partií permokarbonu do hloubky zhruba 100 m. Hodnoty indexu transmisivity  $Y$  se ve většině území pohybují mezi 4,2 a 6,2. Krásný et al. (1982) uvádí hodnoty indexu transmisivity  $Y$  mezi 5,0 – 6,0 (obr. 6). Přibližně odpovídající koeficient transmisivity je 1,5 – 150 m<sup>2</sup>/d. Místy však byly prokázány pouze hodnoty kolem 3,0. Ty jsou soustředěny především do území při východním okraji Českého Brodu, kde převládají hodnoty indexu  $Y$  kolísají mezi 3,0 a 4,7 s odpovídajícím koeficientem transmisivity 0,11 – 5,3 m<sup>2</sup>/d. Právě přítomnost nízkých hodnot vede k celkově značné variabilitě transmisivity v celém území (třída transmisivity III-IVf).



**Obrázek 6: Relativní kumulativní četnosti indexu transmisivity  $Y$  souboru vrtů a studní, vymezených v českobrodském permokarbonu**

Krásný et al. (1982). Upraveno

Tato skutečnost s poznatky průzkumných prací, které prokázaly velké rozdíly ve vydatnostech blízkých vrtů hloubených v obdobných horninách, dokládají naprostou převahu puklinové porózy (např. vrt pro vodovod v Českém Brodě; většina vrtů, provedených v permokarbonských horninách, nezastihla volnou hladinu, přičemž rozdíl mezi naraženou a ustálenou hladinou dosahoval v řadě případů několika metrů). Určité zvýšení převládající transmisivity a současně menší variabilitu naznačují vrt hloubené do kvartérních sedimentů a zasahující do permokarbonu (třída transmisivity III).

Čerpací zkoušky (1.SčV) z roku 1990 na 5 hydrogeologických vrtech BD-1, BD-2, VR-3, VR-4 (vzdáleny od sebe pouze cca 4 m) a HV-1 v údolí říčky Šembery (Zahrady, Vrátkov) poskytují téměř identické hydraulické parametry. Hodnoty indexu se na většině území pohybují v rozmezích 5,0 – 6,0 (Zelinka, 1987) určil z čerpací zkoušky vrtu BD-1, 2 hodnotu indexu transmisivity  $Y = 5,5$ , místy však výrazně klesají až k hodnotám kolem 3,0. Koeficient transmisivity dle Z. Zelinky dosahuje hodnot  $X \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ . V oblasti Kouřimské křidy se hodnoty indexu  $Y$  pohybují v rozmezí 5,0 – 6,0. Průměrná propustnost permokarbonských sedimentů ve větší hloubce, zjištěná vrtem NV – 1 (Nová Ves), je velmi nízká (index propustnosti  $Z$  1,5 až 2,3).

### ***3.2.3. Režim a proudění podzemní vody, přírodní zdroje***

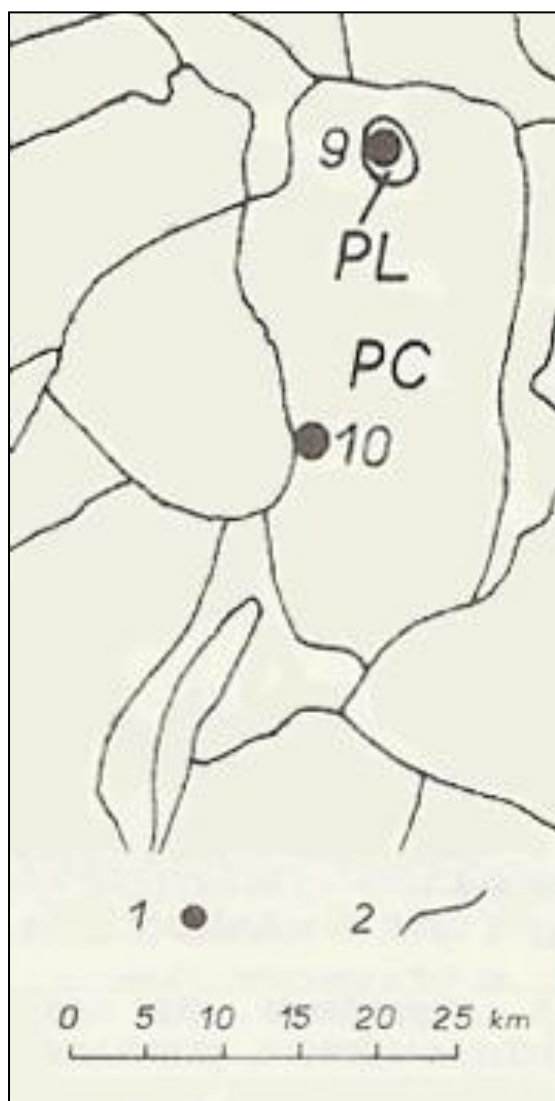
V souvislosti s všeobecně platným poklesem propustnosti permokarbonských sedimentů s hloubkou je významnější proudění podzemních vod vázáno na přípovrchovou zónu zvětrání a přípovrchového rozpojení puklin, zasahující obvykle do hloubky více desítek metrů. U výskytu s větší mocností, zejména ve výskytu českobrodském a chýnovském, je možno ve větší hloubce předpokládat v důsledku všeobecného zmenšování propustnosti proudění značně zpomalené. Chemismus podzemní vody, zjištěný v hlubokém vrtu NV – 1 u Nové Vsi východně od Tábora, by však mohl tento předpoklad zpochybnit. Vzhledem k většinou malému rozsahu vytvářejí výskyty v blanickém příkopu spolu se svým obvykle krystalinickým okolím propojené zvodněné systémy (Pešek, 2001).

Podle Krásného et al. (1982) je v českobrodském permokarbonu významnější proudění vázáno na nejsvrchnější horninové polohy, pravděpodobně do hloubek několika desítek metrů (srov. Krásný, 1976). Ve větších hloubkách lze předpokládat v důsledku všeobecného zmenšování propustnosti - analogicky jako v permokarbonu v podloží křidy (Jetel, 1972) – proudění značně zpomalené. Přírodní zdroje podzemní vody, vyjádřené specifickým podzemním odtokem, budou ve většině permokarbonských výskytů blanického příkopu kolísat mezi 1 a 2 l/s.km<sup>2</sup>.

Na základě již zmíněných informací od Mgr. Dagmar Pavlíkové (ČHMÚ) se na zájmovém území nacházejí dva pozorovací vrt pro sledování hladin a jakosti podzemních vod (obr. 7):

- VP0534 u Kostelce nad Černými lesy, který je stále v činnosti od roku 1965
- VP0533 mezi Viticemi a Dobrým Polem, který ukončil činnost v roce 1997.

Vrt VP0533 ukončil činnost pravděpodobně z důvodu, že byl v těsné blízkosti vrtu VP0534 a tím pádem poskytoval podobné nebo téměř identické parametry. Vrty spadají do jednoho hydrogeologického rajónu číslo 4350, který se nazývá Velimská křída. V roce 1965 byly na nich provedeny bodové odběry, ale záznam o nich na ČHMÚ bohužel chybí. Co se týká stavu hladiny podzemní vody ve vrtu VP0534, tak pravidelně kolísá v intervalu od 396,47 m n. m. do 400,08 m n. m. v rozpětí 3,6 m.



**Obrázek 7: Místa odběrů podzemních vod a geologické celky, v jejichž rámci byly počítány průměrné obsahy a variabilita hlavních složek v podzemních vodách**

Krásný et al. (1982), upraveno.

**Legenda:**

- 1 – vrt;
- 2 – hranice geologických celků Českobrodský permokarbon:
- PC – celé území s výjimkou okolí Liblice;
- PL – okolí Liblice.

### **3.2.4. Výskyt minerálních vod typu solanky (chloridové vody)**

Tyto často mineralizované vody tvoří akumulace v kolektorech hlubších partií permokarbonu. Jejich existence byla prokázána hlubokými vrty. V hlubším úseku vrtu NV – 1 Nová Ves (východně od Tábora) byly zjištěny vody

natrium – chlorid – hydrogenkarbonátového typu. Protože výskyty těchto vod jsou zákonitým projevem obecně platné vertikální hydrochemické zonálnosti, lze jejich existenci předpokládat i v hlubokých partiích českobrodského permokarbonu. Solanky nebyly v žádném z výše uvedených vrtů využity k léčebným nebo průmyslovým účelům

(Krásný et al., 1982; Krásný, 2007).

### **3.3. Praktické aspekty**

Podzemní vody českobrodského permokarbonu jsou využívány poměrně velkým množstvím jímacích vrtů, rozmístěných prakticky v celé ploše výskytu. Větší odběry jsou soustředěny především v prostoru Českého Brodu a dále v oblasti Nučice – Oleška, kde bylo prokázáno i jejich výrazné vzájemné ovlivnění (Kolman, 1970). Vhodně situované vrty podle dosavadních zkušeností jsou nejbezpečnějším způsobem zachycení většího množství podzemní vody, neboť větší prameny se v tomto území vyskytují spíše výjimečně. V ostatních výskytech v blanickém příkopu je podzemní voda využívána jen pro místní potřebu.

Vzhledem k charakteru převládající porózy mohou být zejména zóny zvýšené propustnosti permokarbonských sedimentů snadno zranitelné kontaminací různého původu z povrchu. K plošnému zvýšení obsahu nitrátu a různých typů pesticidů dochází vlivem zemědělské činnosti. Významnější kvantitativní ovlivnění se může projevovat především v důsledku větších soustředěných odběrů podzemní vody. (Krásný et al., 2012).

Problémy s kvalitou podzemních vod mají například v obci Tuchoraz poblíž Českého Brodu (Ing. Helena Pijálková – MÚ Český Brod), kde vody vykazují zvýšené koncentrace dusičnanů pravděpodobně vlivem zemědělské činnosti v daném okolí. V obci Doubravčice podzemní vody, odebrané z místních vrtů hlubších 40 m, zase vykazovaly zvýšené koncentrace arsenu a kadmia, které se ale za nějaký čas pravidelným čerpáním snížily pod mez detekce. Zdroj tohoto znečištění není dodnes znám, neboť není dostatek financí na provedení průzkumných prací a navíc by bylo komplikované a nákladné zdroj znečištění identifikovat, protože doubravčické podloží je velice puklinové a tudíž zdroj znečištění podzemní vody může pocházet odkudkoliv.

Na základě poskytnutých chemických a bakteriologických rozborů z jedné studny (Doubravčice), v různém období, lze vidět, že naměřené hodnoty se zde nezměnily nebo mírně stouply. Důvodem této mírné změny je přítomnost okolní obdělávané zemědělské

půdy. Z obou rozborů na základě závěrečných zpráv od 1.SčV však vyplívá, že voda z této studny, po drobné úpravě, vyhovuje normám pro pitnou vodu (obr. 8 a 9).

Problémy s kvalitou podzemních vod měli také v okolí obce Liblice, kde složení podzemních vod a také kvalitu ovzduší ovlivňovala přítomnost místního cukrovaru. Dokladem toho je internetový článek z 23. června 2003 ([www.ecomonitor.cz](http://www.ecomonitor.cz)), ve kterém si místní obyvatelstvo stěžovalo na nesnesitelný zápach, jehož původcem byl zdejší cukrovar, který manipuloval s hnilým obsahem kalových nádrží. Obrovské hromady zapáchajícího bahna ukládal k usušení přímo v areálu cukrovaru, v městské části obce Liblice. Firma Neli, která tento podnik v hrozném stavu před několika lety koupila, se snaží všechny kaly, které se padesát let z nádrží nevyvážely, odstranit. Kontrola z inspekce životního prostředí navíc zjistila, že firma vypustila špinavé vody z kalových nádrží do nedaleké říčky Šembery. Za to pak cukrovar dostal milionovou pokutu a majitelé propustili vedení podniku. Poté byla výroba v cukrovaru zastavena a byla provedena závazka. Podrobný postup likvidace odpadu z cukrovaru se mi bohužel nepodařilo vyhledat, ale zdroje podzemních vod podle Ing. Pijálkové (MÚ Český Brod) a pana Hovorky (1.SčV) už není tímto průmyslem ohrožen.



S. Lima

Věc.: Chemický a bakteriologický rozbor

Dne 15.8.88

Zasíláme Vám výsledek chemického a bakteriologického rozboru Vámi dodaných vzorků vody ze studny :

pH	7.01
alkalita mmol $H^+$ /l	2.34
oxidovatelnost mg $O_2$ /l	1.0
železo mg/l	0.03
tvrdost celková mmol/l	1.35
amoniak mg/l	0.17
dusitany mg/l	0.005
dusičnany mg/l	1.6
chloridy mg/l	7.70
B - coli /l	0 - žádné
mezofilní bakterie / ml	100

Posudek :

Voda z této studny vyhovuje - nevyhovuje ČSN pro pitnou vodu po chemické a bakteriologické stránce dle námi stanovených ukazatelů.

Podtržené hodnoty překračují přípustnou hranici povolenou ČSN 83 06 11.

Podle zjištěného stupně znečištění lze doporučit :

odčerpání vody

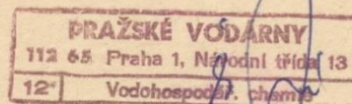
vyčištění studny

zdravotní zabezpečení " S A G E N E M "

Tuto vodu nepoužívejte pro přípravu kojenecké stravy, neboť obsah dusičnanů překračuje hranici 15 mg/l přípustnou pro tento účel dle ČSN 83 06 11.

S pozdravem

Vyřizuje : *S. Lima*



Obrázek 8: Rozbor vody ze studny v obci Doubravčice. I.SčV (1988).

• Mikrobiologické ukazatele •				
Ukazatel	symbol	jednotka KTJ	počet KTJ	Limit
Počet kolonií při 22°C	PK	1ml		200
Počet kolonií při 36°C	PK	1 ml	170!	100
Koliformní bakterie	KB	100 ml	150!!	0
Escherichia coli	EC	100 ml		0
Enterokoky	EK	100 ml	0	0
Clostridium Perfringens	CP	100 ml		0
Pseudomonas aeruginosa	PA	250 ml		0
• Biologické ukazatele •				
Ukazatel	Symbol	jednotka	jedinci	Limit
Mikroskopický obraz- živé organismy	ŽO	1 ml		0
Mikroskopický obraz- počet mikroorganismů	PO	1 ml		50

KTJ=kolonie tvořící jednotka

• Chemické ukazatele •				
Ukazatel	symbol	jednotka	koncentrace	Limit
Reakce vody	pH		7,40	6,5-9,5
Tvrdost celková		mmol/l		5
Dusitany	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	mg/l	0,01	0,50
Dusičnany	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/l	1	50
Chloridy	Cl <sup>-</sup>	mg/l		100
Sířany	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mg/l		250
Chem. spotřeba kyslíku Mn	CHSK <sub>Mn</sub>	mg/l	1,1	3,0
Amonné ionty	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	mg/l		0,50
Vápník	Ca	mg/l		>30
Hořčík	Mg	mg/l		>10
Železo	Fe	mg/l		0,20
Zákal		ZF		5
Vodivost	κ	mS/l		125

Obrázek 9: Rozbor vody. 1.SčV (2004). Upraveno.

V současné době je na zájmovém území povolena pouze těžba písku (obec Chrástřany) a u obce Brník těžba žáruvzdorných jílu a jílovců v pískovcích, která kvalitu podzemní vody nijak neohrožuje, neboť splaškové vody, které touto činností vznikají, jsou likvidovány prostřednictvím čištění v septiku a poté vypouštěny do okolních vodních toků (Krajský Úřad Středočeského kraje, odbor životního prostředí a zemědělství).

## KAPITOLA 4. MATEMATICKÝ MODEL

Obecně lze říci, že matematický model je zjednodušením popisu reálného systému, který pomocí matematických prostředků simuluje fungování tohoto systému. Matematické modelování vychází z určení základních kvantifikovatelných (měřitelných) veličin z matematických formulací vztahů mezi nimi, to je vztahů mezi charakteristikami systému a vztahů definujících procesy, které v systému probíhají. Takovými charakteristikami mohou být teplota a tepelný tok, posunutí bodů při zatížení tělesa a síly působící na jeho části, rychlost pohybu, elektrický potenciál apod. Tyto veličiny a vztahy mezi těmito veličinami vytvářejí matematický model. Při formulaci matematických modelů musíme zanedbávat souvislosti, které jsou méně významné, jinak by vytvořené modely byly příliš složité, těžko řešitelné a těžko srozumitelné pro použití. Pokud je ovšem zjednodušení velké, pak řešení modelu nebude odpovídat skutečnosti a pak je naopak potřeba přikročit k doplnění a použití



často mnohem složitějších modelů. Je dobré vědět, že existují hierarchie modelů, které jsou postupně více a více složité. Proto také nesmíme zapomínat na ověřování vztahu modelu a skutečnosti, kterému se říká validace modelu a které má ukázat přesnost a vypovídací schopnost modelu přes přijatá zjednodušení. Jen po řádné validaci můžeme model používat k predikci nových stavů a dějů. Matematický model může být formulován jako soustava rovnic a nerovnic. V mém případě se bude jednat o model, který je formulován jako okrajová nebo počátečně okrajová úloha pro diferenciální rovnice. V tomto ohledu matematika poskytuje analytická řešení některých speciálních případů, ale především řadu numerických metod pro přibližné řešení obecnějších úloh. Mezi tyto metody patří i metoda konečných prvků, pomocí které bude daný matematický model řešen. Samozřejmě i zde je nutné ověřovat vztah řešení matematického modelu a přibližného řešení, navíc vzniklého realizací numerických metod na počítači s konečnou aritmetikou. Tomuto ověření se říká verifikace numerické či počítačové realizace modelu (Blaheta, 2012).

Matematické modelování proudění vody se využívá pro popis proudění vody např. ve vodovodních sítích, v řekách, v kanalizačních systémech, ve vodohospodářských stavbách a také k popisu proudění podzemní vody. Modelování proudění podzemní vody můžeme využít při řešení celé širé hydrogeologických problémů.

V posledních dvaceti letech došlo ve většině inženýrských disciplín k rychlému rozvoji moderních vědních oborů založených na výpočetní technice. V souladu se současnými trendy se využívají jako moderní prostředky k popisu vodní bilance v hydrogeologii simulační modely. Tyto simulační modely umožňují na rozdíl od klasických metod ucelený a komplexní přístup k řešené problematice, podrobnou analýzu působení všech důležitých faktorů a vyzkoušení mnoha variant řešení včetně očekávaných dlouhodobých výsledků. Simulační modely transportních procesů patří k těmto modelům a je jimi možno simulovat například migraci znečištění, jeho rozpad a posuzovat mnoho variant ekologických scénářů (Vogel, Císlarová, 1998).

Matematické modely jsou explicitní sekvence souboru na sebe navazujících rovnic, numerických a logických kroků, které transformují numerické vstupy do numerických výstupů (rovnice, veličiny, parametry, algoritmus), (Dingman, 2002).

#### **4.1. Základní dělení matematických modelů**

Hrádek a Kuřík (2002), Kovář (1990) a Beven (2001), rozdělují matematické modely do tří základních skupin:

- stochastické
- deterministické
- smíšené

Stochastické modely představují skupinu modelů, které můžeme charakterizovat absencí vazebnosti mezi příčinou a následkem popisovaného jevu v rámci charakterizovaného systému.

Deterministické modely vyjadřují pomocí matematických vztahů takové chování fyzikálních systémů, při němž je každá následující fáze jednoznačným důsledkem fáze předcházející. Přesnost popisu fyzikálního systému modelem se může zvyšovat s ohledem na kvalitu vstupních dat, protože se stoupající přesností popisu stoupají i nároky na vstupní data. Podle kvantity a kvality pozorovaných proměnných a odvozených parametrů se ustálilo základní rozdělení deterministických modelů do dvou skupin:

- hydrologické modely (také označovány jako parametrické nebo srážko - odtokové)
- hydrodynamické modely (Deterministic, hydrodynamic Laws -DL modely)

Hydrodynamické modely fyzikálně popisují realitu nejvěrněji. Respektují alespoň některý z principů zachování hmoty, hybnosti a energie. Jsou to modely s geometricky rozdělenými parametry, které popisují řešené procesy pomocí diferenciálních rovnic. Struktura systému je u hydrodynamických modelů vložena přímo do základních rovnic. Modely mohou popisovat vybrané dílčí hydrologické a hydrogeologické procesy (komponentní modely) nebo všechny hydrologické a hydrogeologické procesy v povodí (komplexní modely). Do této skupiny modelů patří i Feflow, hlavní použitý program v této práci. FeFlow představuje jeden z nejpropracovanějších souborů programů pro modelování proudění podzemní vody a transportních procesů v porézním prostředí za nasycených a nenasyčených podmínek. FeFlow je simulační systém založený na metodě konečných prvků, který obsahuje interaktivní grafické rozhraní, nástroje pro regionalizaci a vizualizaci dat a účinné numerické techniky. Poskytuje nástroje pro tvorbu sítě konečných prvků, přiřazení modelových parametrů a okrajových podmínek, průběh simulace a vizualizaci výsledků.

Mezi stochastickými a deterministickými modely může docházet k překrývání. Tím dostáváme takzvané smíšené modely. Tyto modely pak obsahují podmodely (submodely) stochastické i deterministické povahy a používají se primárně pro zdokonalení výstupů deterministického modelu. Přírodní procesy jsou ve své podstatě neopakovatelné. To je způsobeno vzájemným spolupůsobením příčinných (deterministických) a nahodilých (stochastických) faktorů. Z tohoto důvodu každý pokus o jejich modelování předpokládá jisté zjednodušení (Hrádek a Kuřík, 2002).

## 4.2. Numerické metody

Parciální diferenciální rovnice popisující trojrozměrné nestacionární proudění podzemní vody jsou ve své obecné formě analyticky jen obtížně řešitelné, a proto se někdy v praxi používají různá zjednodušení (např. hydraulický přístup – zanedbání vertikální složky rychlosti proudění a převedení prostorového proudění na rovinné) umožňující alespoň přibližná řešení konkrétních problémů.

Analytické řešení je většinou možné jen v případě, že zájmová oblast má jednoduchý, ideálně čtvercový či obdélníkový tvar, prostředí je homogenní izotropní, počáteční podmínka je definována konstantní hodnotou v celé oblasti a na hranicích platí jednoduché okrajové podmínky. Pokud charakter úlohy je v souladu s uvedenými zjednodušujícími předpoklady, pak lze nalézt analytické řešení i poměrně složitěho problému.

S rozvojem numerické matematiky a výkonnosti samočinných počítačů se do popředí v řešení úloh popisovaných parciálními diferenciálními rovnicemi dostaly numerické metody. Pomocí numerických metod, z nichž jsou pro řešení proudění podzemní vody nejčastěji používané metoda konečných diferencí a metoda konečných prvků, viz dále, se vytvářejí numerické modely, které umožňují za pomoci samočinných počítačů simulovat požadovaný děj. Výhodou simulačních modelů je, že nevyžadují pravidelný tvar hranice řešené oblasti, prostředí nemusí být homogenní ani izotropní, na různých částech hranice mohou platit různé okrajové podmínky, uvnitř modelované oblasti se mohou vyskytovat zdroje a nory s časově proměnou hodnotou dotace či odběru apod. (Valentová, 1998).

### 4.2.1. Metoda konečných diferencí

Metoda konečných diferencí je jedna z nejstarších používaných numerických metod, která se používala již před využíváním výkonné výpočetní techniky. Základní princip metody konečných diferencí spočívá v nahrazení parciálních derivací, které se nacházejí v základních řídicích rovnicích algebraickými výrazy, které vyjadřují podíl konečných diferencí závislé proměnné a nezávislé proměnné (Říha, 1997).

### 4.2.2. Metoda konečných prvků

Tato novější metoda se od metody konečných diferencí liší v celkovém přístupu k řešené problematice. Ve srovnání s metodou konečných diferencí představuje metoda konečných prvků novější numerickou metodu, která pro svou výhodnost doznala v modelování proudění podzemní vody velkého rozšíření. Zatímco v metodě konečných diferencí lze hledat řešení pouze v izolovaných bodech (uzlech sítě). V metodě konečných prvků je hledaným řešením spojitý nebo po částech spojitý průběh neznámé veličiny v celé

řešené oblasti, která je předem rozdělena na konečné prvky. Na rozdíl od metody konečných diferencí, která vyžaduje ortogonální síť, není při tvorbě sítě konečných prvků nutno dodržovat žádnou pevnou strukturu, síť je možno přizpůsobit složitým tvarům dané oblasti a je možné ji lokálně zahušťovat dle potřeby uživatele s návazností na reálný tvar řešené oblasti. Konečné prvky mohou mít tvar obecného trojúhelníku nebo čtyřúhelníku s různým počtem uzlů (ve vrcholech i na stranách), je dokonce možné použít i prvky s křivočarými stranami (Valentová, 1998).

Výhodou metody konečných prvků oproti metodě konečných diferencí je, že každý konečný prvek může mít obecně různé fyzikální vlastnosti, které je během výpočtu možné měnit na základě získaných mezivýsledků. Výsledná matice soustavy algebraických lineárních rovnic je symetrická a pásová s dominantní diagonálou. Dále je v metodě konečných prvků výrazně snazší realizace okrajových podmínek (Říha, 1997). Při aplikaci metody konečných prvků se nejčastěji vychází ze dvou principů:

- Variační princip
- Princip vážených reziduí

Při použití variačního principu se řešená úloha nejprve převádí na variační problém, tj. na problém nalezení funkce, která udělí extrémní hodnotu určitému funkcionálu. Metoda vážených reziduí spadá mezi tzv. přímé variační metody, které vycházejí přímo z diferenciálních rovnic popisujících řešený problém. Metodu lze použít i pro problémy, pro které není klasická variační formulace známa. Při řešení těchto rovnic se používá např. Galerkinova metoda (Valentová, 1998).

Hlavní nevýhody metody konečných prvků jsou složité algoritmizace popisovaných úloh a problémy s divergencí v případě smíšených problémů.

Rozdělení analyzované oblasti na podoblasti (konečné prvky = elementy) respektující nebo částečně respektující požadavky:

- vzájemně se nepřekrývají
- jejich sjednocení zahrnuje celou analyzovanou oblast
- v každém prvku sítě konstantní parametry analyzované struktury.

Nejjednoduššími prvky v různých dimensích jsou:

- úsečky (1D)

- trojúhelníky (2D)
- obdélníky (2D)
- čtyřstěny (3D)

#### 4.2.3. Okrajové a počáteční podmínky

Valentová (1998) rozlišuje při řešení hydrogeologických úloh následující okrajové a počáteční podmínky. První okrajovou podmínkou je myšlena hranice s předepsanou hodnotou hydraulické výšky. Jestliže ve všech bodech hranice řešené oblasti nebo na její části známe hodnotu hydraulické výšky po celou dobu zkoumaného procesu, jedná se o hranici s předepsanou hodnotou hydraulické výšky – okrajová podmínka prvního typu, nazývaná také Dirichletova. Tuto podmínku lze vyjádřit pomocí zápisu

$$H = f_1(x, y, z) \text{ nebo } H = f_2(x, y, z, t) \text{ na } S, \quad (1.1)$$

kde  $f_1$  a  $f_2$  jsou známe funkce. První případ vyjadřuje stacionární podmínku, zatímco ve druhém případě je okrajová podmínka závislá na čase. Okrajové podmínky tohoto druhu se vyskytují vždy tam, kde je oblast proudění v přímém kontaktu s otevřenou volnou hladinou – řekou, jezerem apod.

Další okrajovou podmínkou je myšlena hranice s předepsaným tokem. Jestliže ve všech bodech hranice je známa hodnota toku ve směru kolmém na hranici, jedná se o Hranici s předepsaným tokem

$$v_n = f(x, y, z, t) \text{ na } S, \quad (1.2)$$

kde  $v_n$  je složka rychlosti kolmá k hranici oblasti a směřující ven z oblasti a  $f(x, y, z, t)$  je známá funkce. Tato okrajová podmínka se nazývá také jako okrajová podmínka druhého druhu, nebo Neumannova okrajová podmínka. Speciálním případem této okrajové podmínky je nepropustná hranice. V případě nepropustné hranice je složka hustoty toku kolmá k hranici rovna nule  $v_n = 0$ .

Další typ okrajové podmínky, jako je polopropustná hranice, se vyskytuje tam, kde oblast proudění je v kontaktu s otevřeným vodním zdrojem (nebo jiným porózním prostředím) a je oddělena polopropustnou vrstvou. Pro tento druh okrajové podmínky se používá označení třetího druhu, Newtonova, někdy také Robinova, okrajová podmínka. Předpokládejme, že  $H$  je hodnota hydraulické výšky na dané části hranice oblasti a  $H_0$  je hydraulická výška vně polopropustné vrstvy. Velikost toku kolmo k hranici řešené oblasti lze vyjádřit pomocí vztahu:

$$v_n + (H_0 - H) / c = f_3(x, y, z, t), \text{ kde } c = B / K, \quad (1.3)$$

kde  $B$  je mocnost polopropustné vrstvy,  $K$  je její hydraulická vodivost,  $c$  je odpor vrstvy.

Počátečními podmínkami rozumíme stav charakterizující proudění v čase  $t_0 = 0$ . Stanovení těchto podmínek nám umožňuje řešit nestacionární proudění. Schematicky lze podmínku vyjádřit jako funkci  $f()$  souřadnic  $x, y, z$  v prostoru v čase  $t_0$ , kdy známe hydraulickou výšku  $H$ . Průběh hydraulické výšky se s časem mění (Mucha, Šestakov, 1987).

$$H = f_0(x, y, z) \text{ v } \Omega \quad (1.4)$$

### 4.3. Vstupní podklady pro matematický model

Aby bylo možné vytvořit matematický model proudění podzemní vody v dané lokalitě, bylo potřeba nejprve danou lokalitu přesně vymezit. Lokalita byla vymezena na základě geologického výskytu českobrodského permokarbonu, který byl popsán již v předchozí kapitole (kapitola 2. 2. Geologický přehled). Dále na základě údajů z geologických sond, inženýrsko-geologických a hydrogeologických vrtů, které byly v dané lokalitě realizovány. Tyto údaje jsem převzala z posudků uložených v Geofondu, ulice Kostelní 26, Praha 7. Pomocí geologických profilů, popsanych v jednotlivých posudech, jsem vytvořila geologické řezy. Nakonec jsem vytvořila modely hydroizohyps. Na základě těchto všech podkladů byla vymezena oblast pro matematický model proudění podzemní vody pouze svrchní zvodně v severní části českobrodského permokarbonu, respektive v oblasti hydrologického povodí Horního a středního Labe, hydrologického povodí 4. řádu řeky Výrovky (HEIS.VUV.cz).

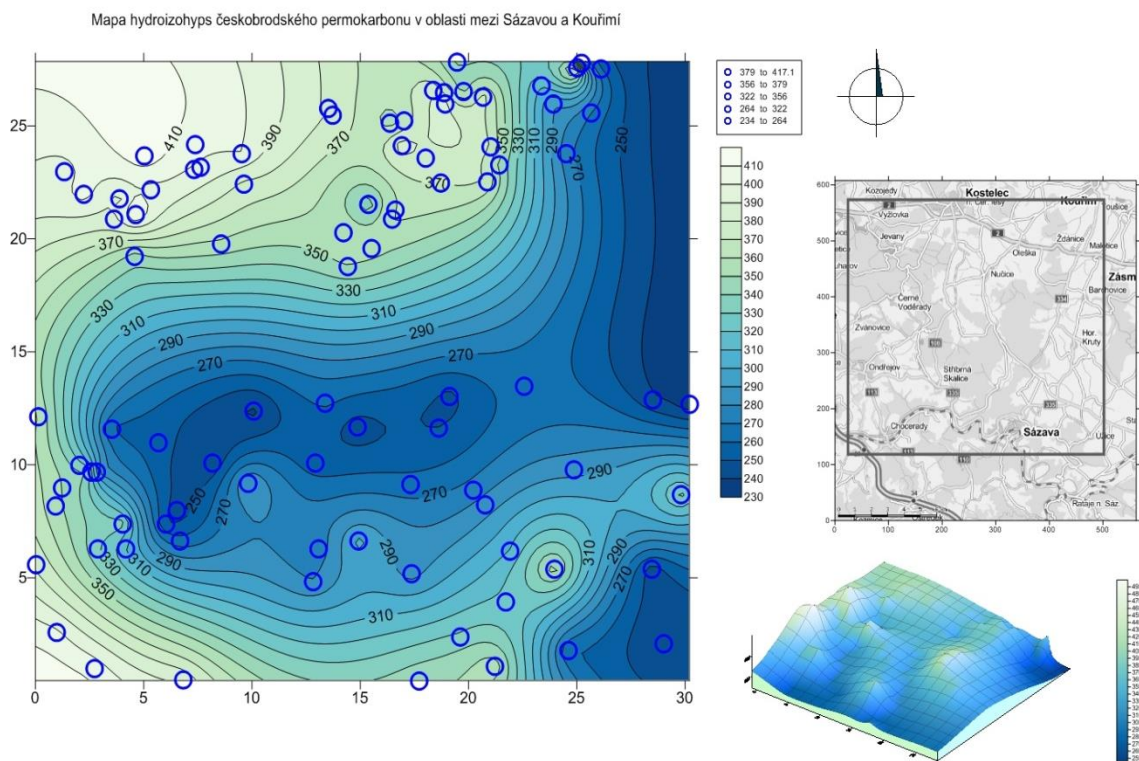
#### 4.3.1. Údaje z HG/IG vrtů

Na webových stránkách vrtné geologické databáze jsem vybrala na území českobrodského permokarbonu 109 geologických sond, inženýrsko-geologických a hydrogeologických vrtů. V geofondu jsem pak vyhledala jejich posudky, které jsem důkladně prostudovala a vypsala z nich potřebná data pro realizaci matematického modelu proudění podzemní vody svrchní zvodně. Pomocí geologických profilů popsanych v jednotlivých posudech jsem vytvořila geologické řezy, které mi měly posloužit k objasnění bližších geologických a hydrogeologických poměrů v zájmovém území a pro detailnější vymezení modelované oblasti. Vytvořila jsem 3 příčné, VZ směrem orientované geologické řezy a jeden podélný, SJ směrem orientovaný geologický řez se zakreslenými hladinami podzemních vod. Geologické řezy mi měly detailněji objasnit stavbu geologického podloží celé oblasti. Ale geologické poměry jsou zde velmi komplikované (nepravidelné střídání kolektorů a izolátorů)

a v potřebném detailnějším měřítku málo ucelené. Navíc hladiny podzemních vod hlubšího oběhu nebylo možné s jistotou propojit. Proto jsem se rozhodla, po konzultaci s vedoucím diplomové práce, vymezit oblast na základě modelů hydroizohyps pouze svrchní zvodně.

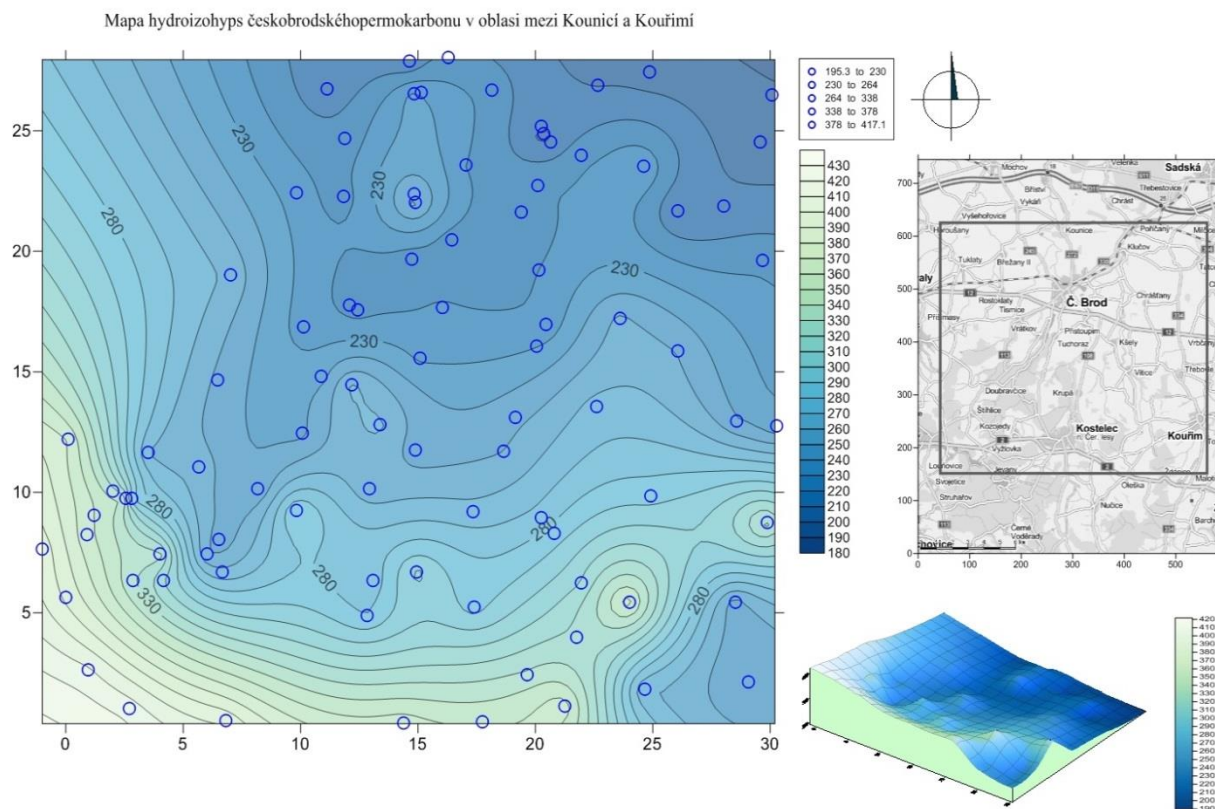
#### 4.3.2. Hydroizohypsy

Hydroizohypsou je myšlena spojnice bodů se stejnou úrovní volné hladiny určité zvodně měřené ve stejném čase. Pro tvorbu modelu hydroizohyps jsem použila aplikaci Golden software Surfer 10. 7. 972, která umožňuje snadnou tvorbu map a prezentačních dokumentů využívající mapová data. Surfer poskytuje jednoduchý převod mapových dat do podoby efektních a plně barevných vrstevnicových, povrchových, stínovaných profilovaných, pohledových, pevnostních a vektorových dat, či drátěných modelů. Pomocí překrytí několika map lze také rychle identifikovat trendy v jednotlivých datech. V programu surfer mohu rovněž provádět výpočty objemu, vyhlazování, mozaikování, filtrování, provádění matematických výpočtů na povrchu nebo mezi povrchy, výpočty funkcí a další. Surfer lze mimo tvorby map využít i pro modelování terénu, vizualizaci terénu, analýzu povrchu, mřížkování, volumetrii atd. Pomocí této aplikace jsem tedy postupně vytvořila 3 modely hydroizohyps zahrnující celou oblast českobrodského permokarbonu. První model hydroizohyps zahrnoval území od města Sázavy na jihu oblasti k městu Kouřimi ve střední části oblasti (obr. 10).



Obrázek 10: Schéma mapy hydroizohyps od Sázavy ke Kouřimi

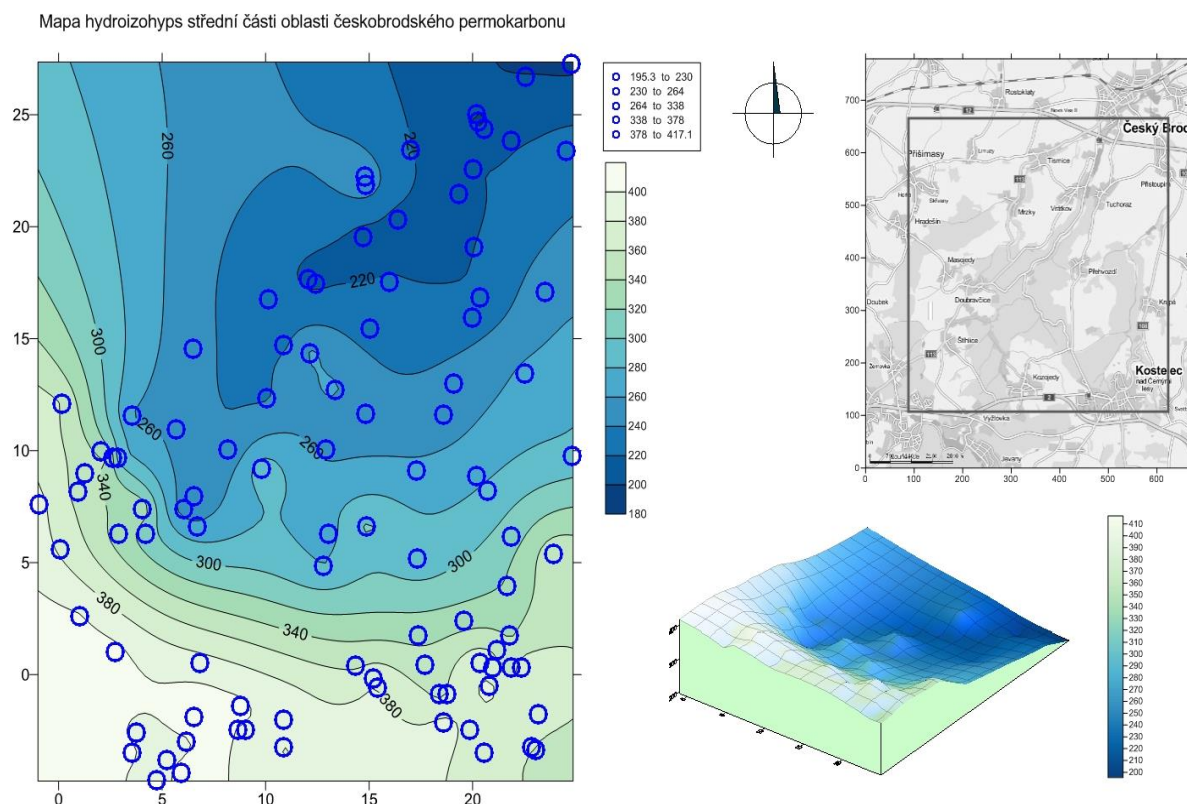
Druhý model hydroizohyps zahrnoval území vymezené od města Kounice ležícího v severní části oblasti k městu Kouřimi ležícímu ve středu oblasti českobrodského permokarbonu (obr. 11).



Obrázek 11: Schéma mapy hydroizohyps od Kouřimi ke Kounici



Třetí model hydroizohyps pak představoval střed oblasti českobrodského permokarbonu a vznikl jako průnik dvou již výše zmíněných vymezených oblastí (obr. 12).



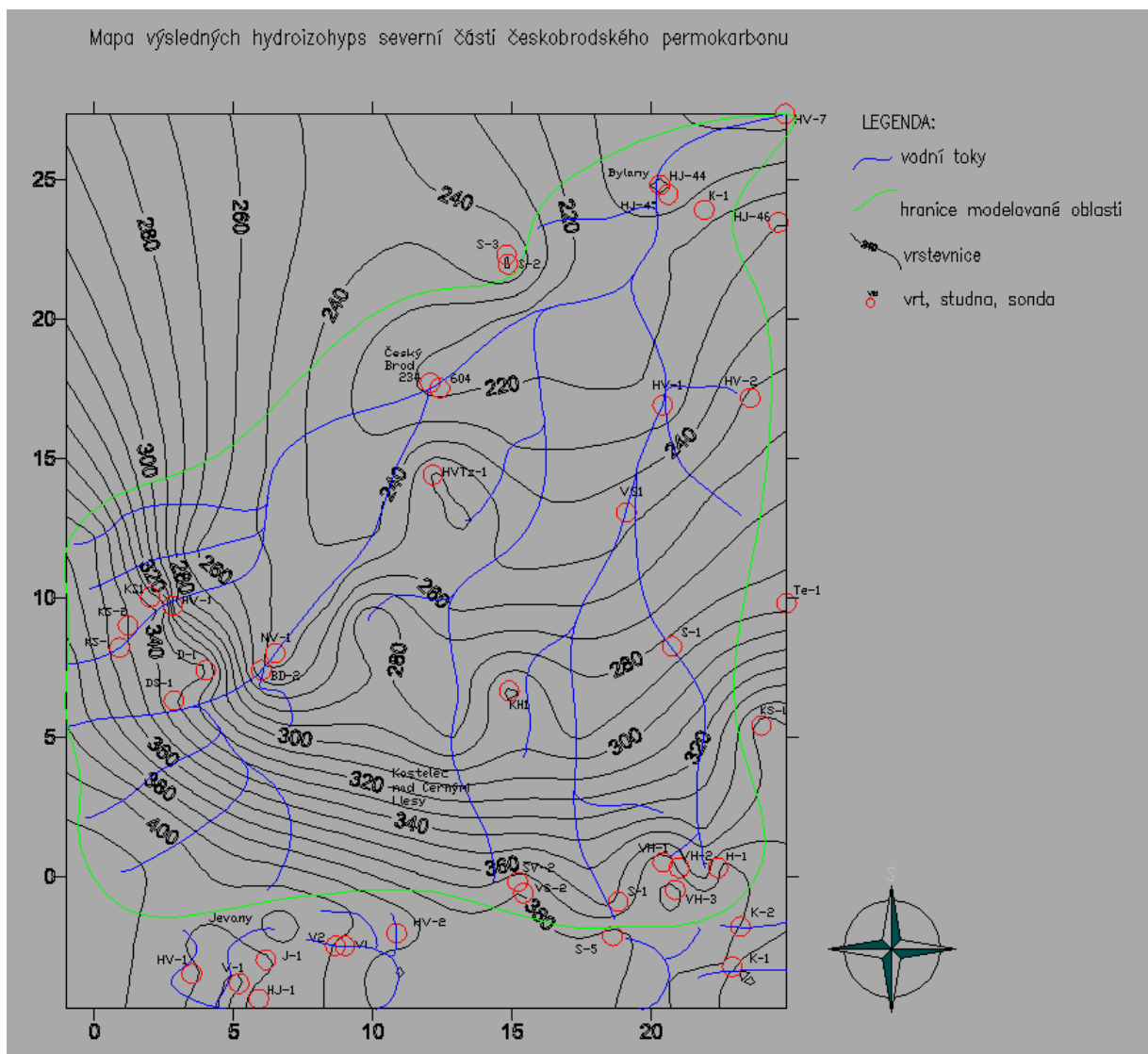
**Obrázek 12: Schéma mapy hydroizohyps jako průnik dvou oblastí**

Modely hydroizohyps byly vytvořeny na základě souřadnic jednotlivých vrtů na daném území a výšek ustálených hladin podzemní vody, souřadnic a výšek hladin vybraných bodů na jednotlivých vodotečích. Souřadnice jednotlivých vrtů jsem odečetla na mapovém serveru České geologické služby ([www.geology.cz](http://www.geology.cz)), informace o výškách hladin podzemní vody byly převzaty z posudků jednotlivých vrtů. Souřadnice a výšky hladin na vodotečích protékajících územím pak byly převzaty z dat ZABAGET poskytnutých Českým úřadem zeměměřičským a katastrálním. Všechny mapy hydroizohyps jsou obsaženy v přílohové části (přílohy č. 3 – 6).

#### **4.3.3. Vymezení modelované oblasti**

Proudění vody ve vodotečích a údajům z jednotlivých vrtů nejvíce odpovídal model hydroizohyps (viz kapitola 4.1.2 Hydroizohyps) z oblasti zahrnující území od města Kouřimi k městu Kounici, proto zvolená oblast byla vymezena na základě tohoto modelu a dále na základě vodotečí potoků Šembery, Bušince, Jalového potoka, Chotýšského potoka a Bylanky

pramenících právě v této oblasti (obr. 13). Jedná se tedy o severní část českobrodského výskytu permokarbonu, respektive o oblast hydrologického povodí Horního a středního Labe, hydrologického povodí 4. řádu řeky Výrovky (HEIS.VUV.cz).



Obrázek 13: Schéma vymezení oblasti dle modelu hydroizohyps a vodotečí

#### 4.3.4. *Hydraulické parametry*

Z hydrogeologických map dané oblasti (Hydrogeologická mapa ČSR 13 – 13 Brandýs nad Labem – Stará Boleslav, Hydrogeologická mapa ČR 13 – 31 Říčany) a z hydrogeologických posudků jsem převzala informace o transmisivitě, hydraulické vodivosti hornin a o mocnosti zvodně v jednotlivých vrtech, o infiltraci a o srážkových poměrech v dané oblasti. Pokud někde uvedená data chyběla, byla dopočítána pomocí vztahu pro

výpočet transmisivity **T**, který definoval Theis (1935) jako součin hydraulické vodivosti **k** a zvodněné mocnosti **m**.

Transmisivita (koeficient průtočnosti) má rozměr plochy dělené časem a číselně se rovná průtoku obdélníkovou plochou jednotkové šířky a výšky rovné zvodněné mocnosti **m** umístěnou ve zvodněné vrstvě kolmo na horizontální směr proudění při jednotkovém gradientu hydraulické výšky. Vyjadřuje se tedy v m<sup>2</sup>/s. (Pastuszek, 2008).

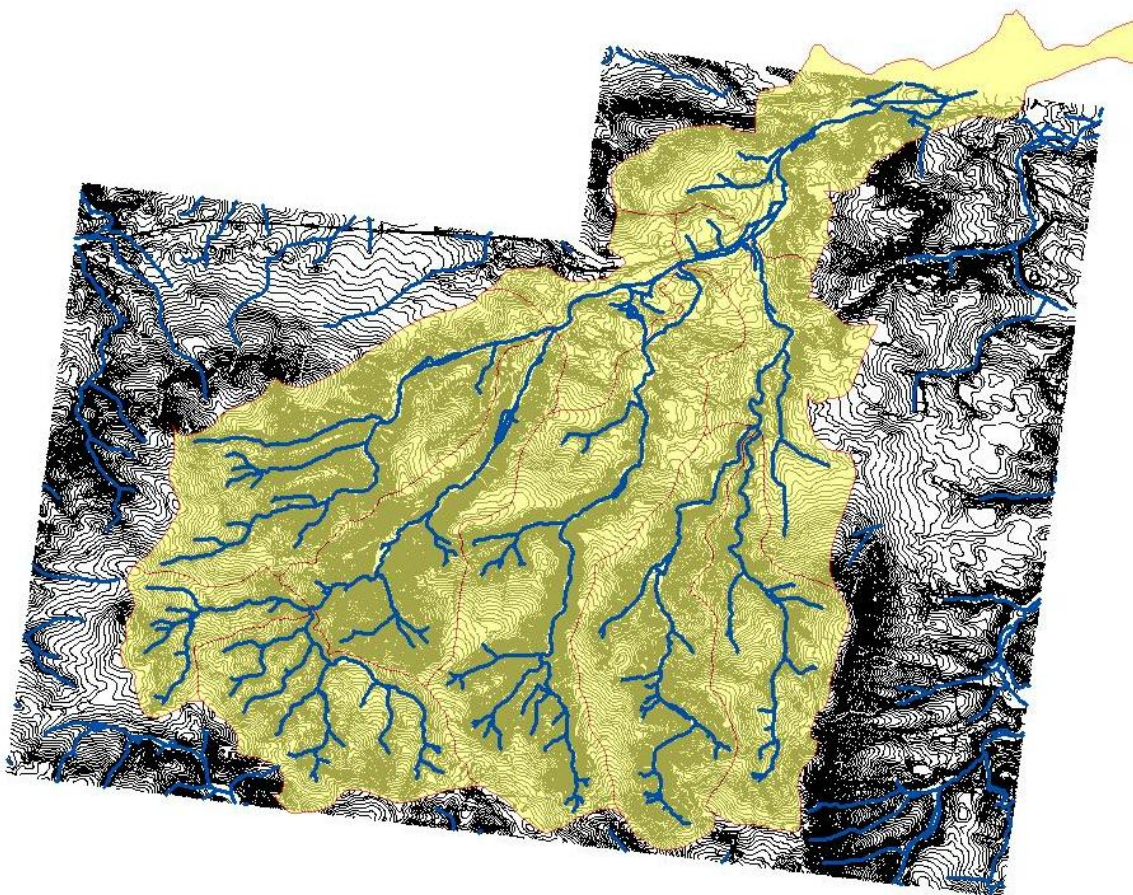
## KAPITOLA 5. TVORBA 3D MODELU VE FEFLOW 5.2

Dříve než bylo možné vytvořit 3D matematický model proudění podzemní vody svrchní zvodně v severní části českobrodského permokarbonu, musela být podkladová data ZABAGET zjednodušena a převedena pro potřeby daného modelu. Data byla zjednodušena pomocí aplikace ArcGIS for Desktop 10. 1 a dále pomocí již výše popsané aplikace Golden software Surfer 10. 7. 972 (viz kapitola 4.1.2. Hydroizohypsy).

ArcGIS for Desktop 10. 1 obsahuje řadu vzájemně propojených aplikací jako je ArcMap, ArcCatalog a ArcToolbox. ArcMap je centrální aplikace ArcGIS for Desktop, která slouží pro všechny mapové úlohy včetně kartografie, prostorových analýz a editace dat. Aplikace ArcMap poskytuje dva různé pohledy na mapu: zobrazení geografických dat a zobrazení výkresu mapy. V zobrazení geografických dat pracuji s geografickými vrstvami a mohu zde měnit symboliku, analyzovat a kompilovat datové sady GIS. Rozhraní tabulky obsahu napomáhá organizovat a ovládat vlastnosti vykreslení datových vrstev GIS v datovém rámci. Zobrazení dat je jakýmsi oknem do datových sad GIS, které mám k dispozici pro danou oblast. V zobrazení výkresu mapy pracuji s mapovými stránkami, které obsahují nejen rámce geografických dat, ale i další mapové prvky, jako jsou legendy, měřítko, severky a referenční mapy. ArcMap slouží pro tvorbu mapových kompozic připravených pro tisk a publikaci. Aplikace ArcCatalog pomáhá organizovat a spravovat data GIS, jako jsou mapy, glóby, datové sady, modely, nástroje, metadata a služby. Aplikace ArcCatalog je vhodná pro organizaci, vyhledávání a využití GIS dat stejně jako pro tvorbu dokumentace geografických dat pomocí metadat odpovídajících standardům. Administrátoři GIS databáze používají ArcCatalog pro návrhy, tvorbu a správu geodatabáze. Administrátor ArcGIS for Server spravuje pomocí aplikace ArcCatalog rámec GIS serveru. Aplikace ArcToolbox obsahuje kompletní sadu funkcí pro zpracování prostorových dat (geoprocessing) včetně dalších nástrojů. ArcToolbox je začleněn do aplikací ArcCatalog, ArcMap, ArcScene a ArcGlobe a je k dispozici v produktech ArcGIS for Desktop Basic, ArcGIS for Desktop Standard a ArcGIS for Desktop Advanced.

## 5.1. Zjednodušení vstupních dat v ArcGIS for Desktop 10. 1

Základní báze geografických dat (ZABAGED) je digitální vektorový geografický model území České republiky, který spravuje Český úřad zeměměřický a katastrální. Tyto data ZABAGED polohopis a ZABAGED výškopis bylo nutné na základě mnou vymezené oblasti zjednodušit, neboť obsahovala velké množství informací, které nebyly pro řešení matematického modelu proudění podzemní vody podstatné. Zjednodušení a převedení dat do podporovaného formátu bylo provedeno pomocí aplikace ArcGIS for Desktop, neboť aplikace FeFlow s tímto množstvím a typem datových formátů pracovat neumí. Nejprve byla data oříznuta podle hranice definičního oboru matematického modelu, tj. podle stanovených hranic modelované oblasti. Také bylo nutné zredukovat množství vrstevnic terénu a zároveň zachovat informaci o jejich poloze a nadmořské výšce. Totéž bylo provedeno s vrstevnicemi vodních toků, které byly zredukovány pouze na jednotlivé body vyjadřující polohu příslušných vodotečí se zachovanou polohou a nadmořskou výškou. Výsledkem těchto úprav byly zjednodušené soubory typu shapefile (obr. 14), které jsem použila jako podklad do softwaru FeFlow, který s tímto formátem dat již dokáže pracovat. Mapy zobrazující severní část oblasti českokobrodského permokarbonu a výsledný tvar oblasti modelování jsou obsaženy v příloze 1 a 2.



Obrázek 14: Schéma podkladových dat doFeFlow 5.2



## 5.2. Koncepční model

Koncepčním modelem je myšlena taková formulace hydraulické okrajové nebo počátečně okrajové úlohy, která je matematicky jednoznačně řešitelná a která co nejlépe odpovídá danému hydrogeologickému problému. Koncepční model tedy formuluje úlohu, kterou má smysl řešit numericky a jejíž numerické řešení má jasně daný vztah k proudění podzemní vody ve zkoumané oblasti a případně čase.

### 5.2.1. Definice oblasti

Jak již bylo popsáno výše, geometrie oblasti byla zvolena na základě geologické minulosti zkoumané oblasti a s přihlédnutím k hranicím hydrologických povodí, které jsem získala na serveru HEIS.VUV.cz. Plocha celé modelované oblasti zaujímá 128 912 159 m<sup>2</sup>, rozměry dané oblasti jsou pak patrné z přílohy č. 1.

Jedná se o trojrozměrný model svrchní zvodně severní části českobrodského permokarbonu, který se skládá ze tří vrstev, z nichž každá je ohraničena horní a spodní plochou a také svislými hranicemi modelu. Každá vrstva má kromě geometrie definovány materiálové hydromechanické charakteristiky, které jsou v daném případě dostatečně určeny hydraulickou vodivostí. Jednotlivá rozhraní zahrnují nodální veličiny, jako jsou počáteční a okrajové podmínky a stejně tak jsou na nich definovány i výsledné údaje, tj. hodnoty neznámé funkce, v našem případě hydraulické výšky.

### 5.2.2. Hydraulické parametry oblasti

Budu předpokládat, že podloží modelované oblasti je nepropustné, proto zde zvolím Neumannovu okrajovou podmínku, která představuje nulový průtok hranicí. Hranici hydrologického povodí také považuji za nepropustnou, přesněji s nulovým průtokem hranicí, proto zde opět zvolím Neumannovu okrajovou podmínku pro nulový průtok ve všech třech vrstvách. Uvedené předpoklady, i když neplatí přesně, se opírají jednak o zjištěná data o geologickém profilu v dané oblasti a o zkušenost, že i při konstantní hydraulické vodivosti platí pro regionální proudění, že hustota toku rychle klesá s hloubkou pod povrchem a dále o to, že oblast byla volena tak, aby její hranice kopírovala rozvodí.

Ve svrchní vrstvě modelované oblasti předpokládám dokonalý kontakt mezi povrchovou vodou v řece a podzemní vodou. To znamená, že zde není hydraulický odpor a hladiny podzemní a povrchové vody jsou v přímém kontaktu. Na základě této skutečnosti zvolím Dirichletovu okrajovou podmínku pro volnou hladinu (tlaková výška je nulová, hydraulická výška je rovna geodetické) po celé délce jednotlivých toků. Dirichletova okrajová podmínka není konstantní a mění se, vzhledem ke spádu hladin, s prostorovými souřadnicemi.

Výška hladiny ve vodotečích je určena na základě nadmořských výšek vybraných bodů na příslušných vodotečích. Tyto body byly získány zjednodušením vrstevnicových dat ZABAGED výškopis a mají v sobě obsaženou informaci o své poloze a nadmořské výšce. Dirichletovu okrajovou podmínku také zvolím v severovýchodní části hranice modelované oblasti. Tento úsek vytváří uzávěr modelovaného povodí a je jediným úsekem hranice, který není veden po rozvodnici. Předepsaná hydraulická výška je zde konstantní podél každé svislice a její hodnoty jsou určeny výškou hladiny ve vodoteči a zvoleným lineárním průběhem na obě strany.

Na horní části hranice, to znamená na volné hladině podzemní vody, podél linií vodotečí, je hydraulická výška předepsána Dirichletovou okrajovou podmínkou a plošná podmínka je Neumannova s hodnotou danou infiltrací srážkových vod, která tvoří třetinu atmosférických srážek.

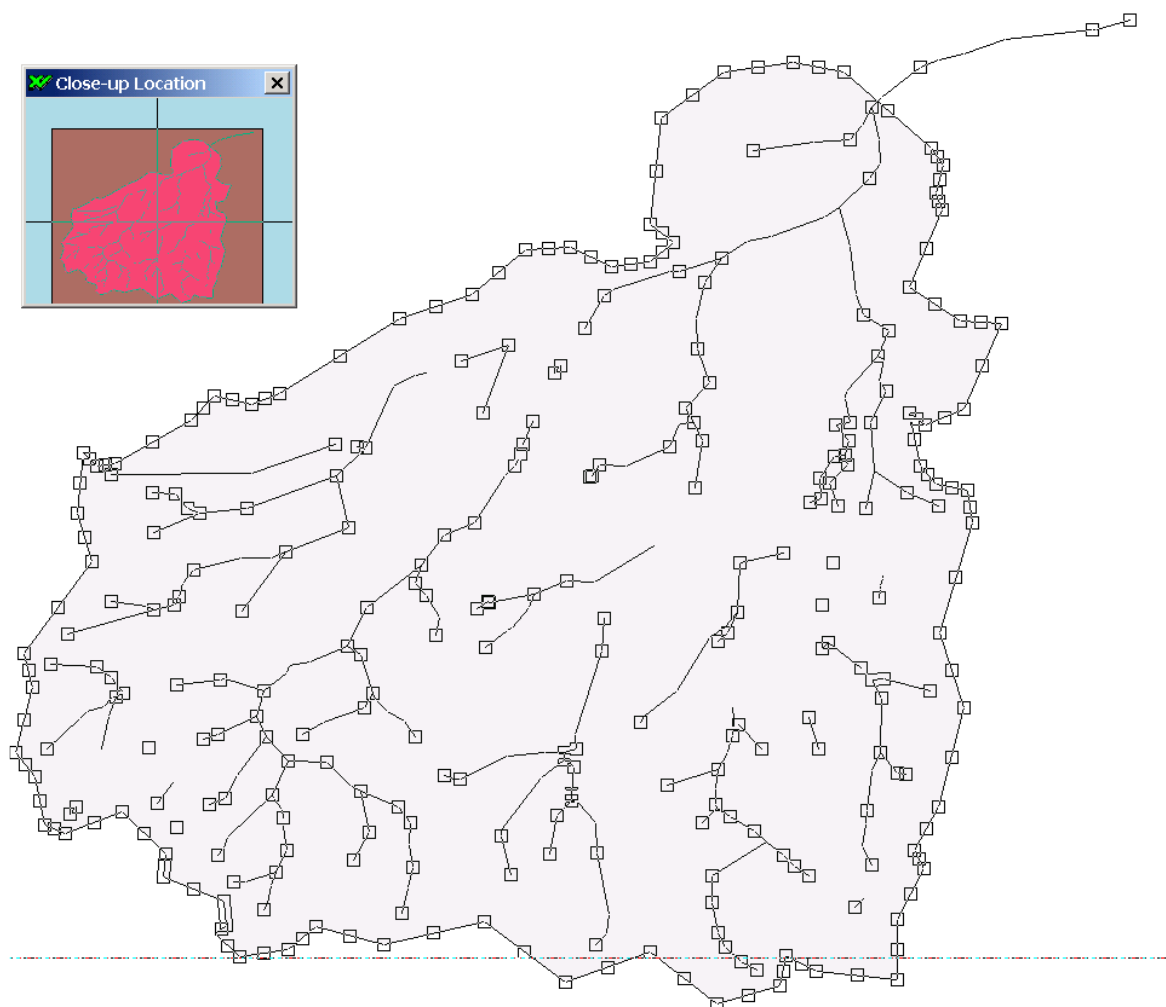
Ve všech vrstvách předpokládám stejné hodnoty hydraulických vodivostí hornin, které byly převzaty z prostudovaných posudků. Jejich hodnota se pohybuje v rozmezí od  $0,08 \cdot 10^{-4}$  do  $5,34 \cdot 10^{-4}$  m/s.

Ve svrchní vrstvě dále předpokládám infiltraci, která představuje třetinu srážkových vod. Její velikost se pohybuje v rozmezí od  $0,6 \cdot 10^{-4}$  do  $0,9 \cdot 10^{-4}$  m/d.

### **5.3. Vlastní práce ve FeFlow 5. 2**

#### ***5.3.1. Tvorba polygonu***

K dispozici mám již zpracovanou mapu hydrologických povodí a vodních toků dané oblasti, kterou pomocí příkazu File - Add Map - vložím do programu FeFlow 5. 2. Zvolené měřítko je dáno velikostí oblasti. I zde musí být nadefinována hranice řešené úlohy, proto na základě konzultace s vedoucím diplomové práce byl severovýchodní cíp oblasti oříznut z důvodu malého množství datových podkladů o vodotečích v této části a také z důvodu nedostatečného množství dat z okolních HG/IG vrtů (obr. 15). Pomocí funkce Mesh Editor v hlavní nabídce si nadefinuji rozsah finálního polygonu, pro který budu proudění podzemní vody modelovat. Pomocí příkazu Edit – Design superelement mesh – New mesh editor – Add polygons, kde zvolím Snap to: rozvodi2.shp, Snap to point, obtáhnu vnitřní hranici oblasti a ukončím tvorbu polygonu pomocí příkazu Stop edit (Diersch H. J. G., 2005). V tuto chvíli mám nadefinovaný polygon pro řešenou oblast.



**Obrázek 15: Schéma finálního rozsahu oblasti**

### **5.3.2. Tvorba sítě**

Pomocí nástroje Mesh editor, který slouží k zadávání geometrických dat popisujících proudění podzemní vody a transportní procesy, vytvořím tzv. superelementy (největší jednotky modelu, které model rozdělí na jednotlivé prostory a vyplní sítí konečných prvků) spojené v uzlech, které popisují geometrii studované oblasti, tj. vnější a vnitřní hranici daného modelu. Tyto superelementy jsou základem pro vytvoření finální geometrické sítě. Počet jednotlivých elementů může být libovolný. Součástí Mesh editoru je funkce Mesh generátor, která vytváří interaktivní sít superelementů pomocí trojúhelníkové nebo čtyřúhelníkové metody konečných prvků. Typ a forma supercementů závisí na zvoleném typu sítě v hlavní nabídce. Na výběr máme buď čtvercovou síť, kde je každý element automaticky ukončen čtvrtým vrcholem, pro který byl nastaven nebo trojúhelníkovou síť (výchozí nastavení), kde může mít každý element libovolný počet vrcholů, což umožňují nesložitější konstrukci. Pro mou oblast

byla zvolena trojúhelníková síť, která přesněji a podrobněji vystihuje geometrii dané oblasti. Jednotlivé elementy jsou vytvářeny na pozadí načtené mapy pomocí funkce správce map.

Při tvorbě sítě je možné použít v dané nabídce funkci, která mi umožní síť definované oblasti zpřesnit. Tato funkce je velmi užitečná, například pro umístění uzlů přesně v místě vrtů nebo podél řek. Funkci mohu použít pouze v případě trojúhelníkové sítě. Pomocí nástroje Mesh generátor mohu zpřesnit použitou metodu konečných prvků. Zde se předpokládá, že v této fázi už je rozsah budoucí sítě nadefinován. Během numerického řešení (spuštěním solveru) je hodnota neznámé funkce (hydraulické výšky) počítána v každém uzlu sítě konečných prvků a interpolovaná v každém konečném prvku. Hustší síť je číselně přesnější a lépe numericky vystihuje modelovanou oblast. Pokud síť obsahuje velké množství zkreslených bodů, mohou vzniknout numerické nepřesnosti. Proto by měla být navržena taková metoda konečných prvků, která problém nejlépe postihne. Při automatickém vygenerování sítě mohu zadat požadovaný celkový počet konečných prvků (výchozí je 1000) pro kompletní oblast elementů. Pro vytvoření moji sítě bylo zadáno 10 000 konečných prvků. V záložce Generator options mohu definovat pravidla pro generování sítě konečných prvků. FeFlow implementuje tři různé generátory:

- **Transport mapping** pro čtyřboké prvky,
- **Advancing front** pro trojúhelníkové prvky pro tvorbu síťových superelementů bez doplňků a
- **TMesh (Delaunay)** pro trojúhelníkové prvky pro tvorbu síťových superelementů včetně doplňků.

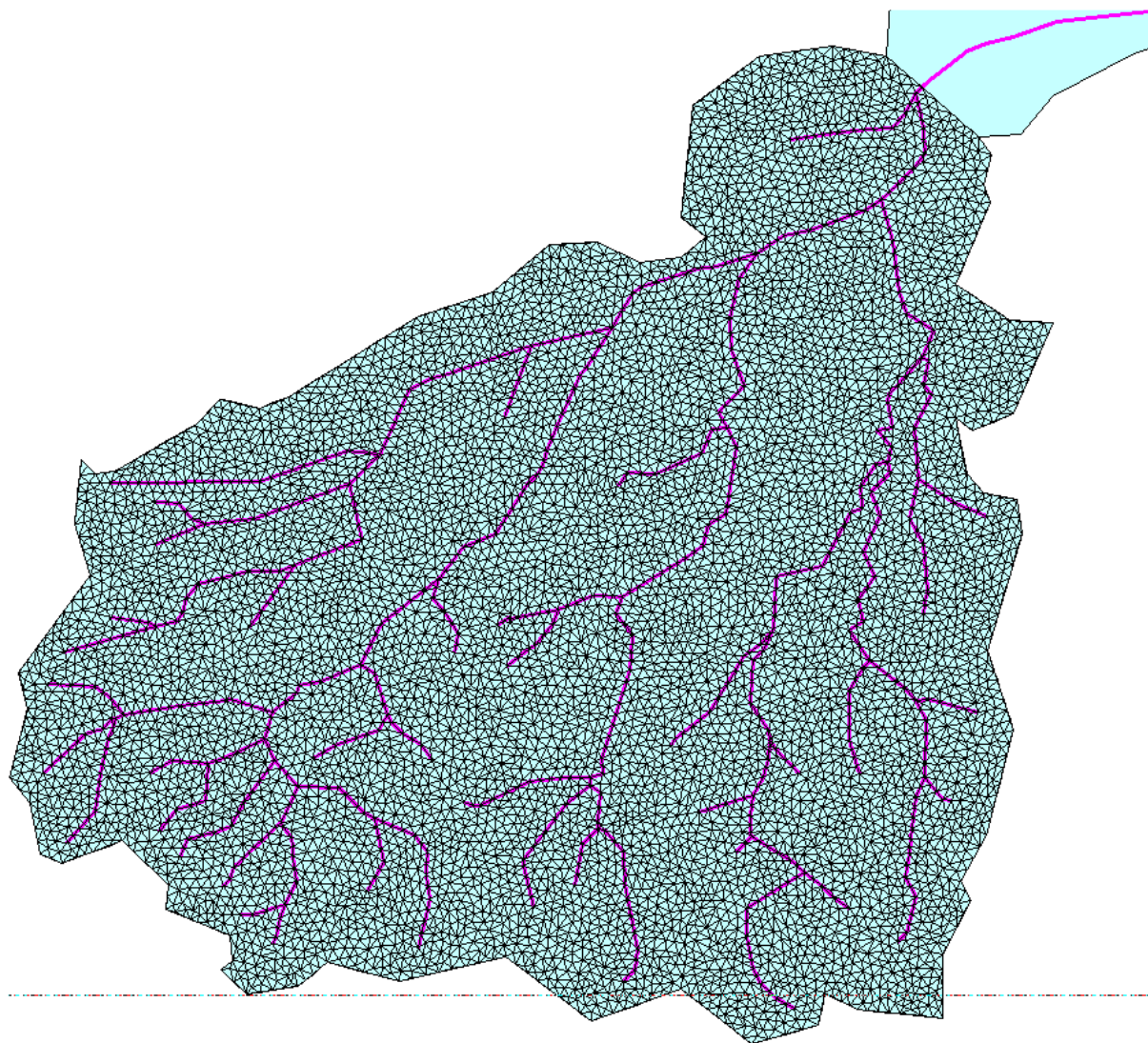
Navíc, je možné použít i Triangle (Delaunay) generátor pro tvorbu složitých síťových superelementů, včetně velkého počtu doplňků (copyright JR Shewchuk, University of California v Berkeley).

Při tvorbě sítě pro mou oblast jsem použila TMesh generátor. Tento generátor, vyvinutý na EPFL - GEOLEP švýcarském technologickém institutu, Laboratoř geologie, Lausanne, Švýcarsko, umožňuje pohodlně definovat lokální variantu hustoty jednotlivých prvků sítě. Po výběru TMesh generátoru zvolím u následujících dvou položek:

- úroveň zjemnění kolem hranice superelementu, kde zadám faktor rafinace pro síť konečných prvků podél hranice superelementu.
- úroveň zjemnění kolem linie / bodu doplňku: zde mohu definovat rafinaci síťových ok podél čar anebo kolem bodů (Diersch H. J. G., 2005).



V tuto chvíli mám nadefinované parametry určující výsledný tvar generované trojúhelníkové sítě (obr. 16).



**Obrázek 16: Schéma výsledné trojúhelníkové sítě oblasti**

### ***5.3.3. Tvorba jednotlivých vrstev***

Aby bylo možné vytvořit 3D model, musely být nadefinovány jednotlivé vrstvy dané oblasti. Proto jsem v nabídce Dimension zvolila možnost dimensions 3D a na základě domluvy s vedoucím diplomové práce vytvořila 3 vrstvy (4 slices), které tvoří povrch, podloží a střední část modelované oblasti. Slices byly vytvořeny pomocí aplikace Golden software Surfer 10. 7. 972. První slice představuje zjednodušený soubor v aplikaci ArcGIS for Desktop 10. 1. Jedná se o soubor obsahující jednotlivé body na daných vodotečích s informací o jejich poloze a nadmořské výšce. Tento slice představuje nejsvrchnější část modelované oblasti.

Druhý slice byl vytvořen odečtením jednotlivých mocností svrchních zvodní získaných z posudků u konkrétních vrtů. Tak jsem vytvořila slice představující podloží dané oblasti. Dva další slices představují 1/3 a 2/3 mocnosti svrchní zvodně, tedy střední vrstvu v dané oblasti. Tyto vrstvy (slices) byly poté načteny a upraveny tak, aby se neprolínaly do softwaru FeFlow 5.2. Případné protínání sliců mohlo být způsobeno interpolační metodou. Výše popsany způsob předepsaného umístění sliců byl aplikován jen v omezeném počtu uzlů, hodnoty v ostatních uzlech byly získány interpolací.

#### **5.3.4. Zadání okrajových podmínek**

Po nadefinování konečného tvaru trojúhelníkové sítě pro danou oblast a po nadefinování trojrozměrného tvaru oblasti je potřeba nastavit a doplnit všechna zbývajících charakteristická data pro danou oblast, jako jsou vlastnosti materiálu nebo počáteční a okrajové podmínky. Za prvé je potřeba zadat o jaký obecný druh prostředí se bude jednat. Mám na výběr mezi klasickým saturovaným a nesaturovaným prostředím nebo proměnlivě saturovaným prostředím. Jelikož řešíme proudění podzemní vody ve svrchní zvodni, jejíž rozsah je dán mocností té dané zvodně, zvolíme klasické saturované neboli nasycené prostředí. V dalším kroku je nutné stanovit, zda se bude jednat pouze o proudění podzemní vody nebo zda bude proudění podzemní vody doprovázeno i přenosem hmot, tepla atd. Pokud zvolíme pouze proudění, musíme určit, jaké bude, zda ustálené nebo neustálené. Na základě zadání diplomové práce jsem zvolila možnost ustáleného proudění podzemní vody. Neboť řeším proudění ve vodorovné poloze a potřebuji, aby vodní toky fungovaly jako místní erozní báze, tudíž byly konformní s hladinou podzemní vody, volím možnost neomezeného aquiferu, pro který platí, že svrchní slice bude volný a pohyblivý, prostřední slices mohou být nespecifikovány a spodní slice bude definován jako pevný.

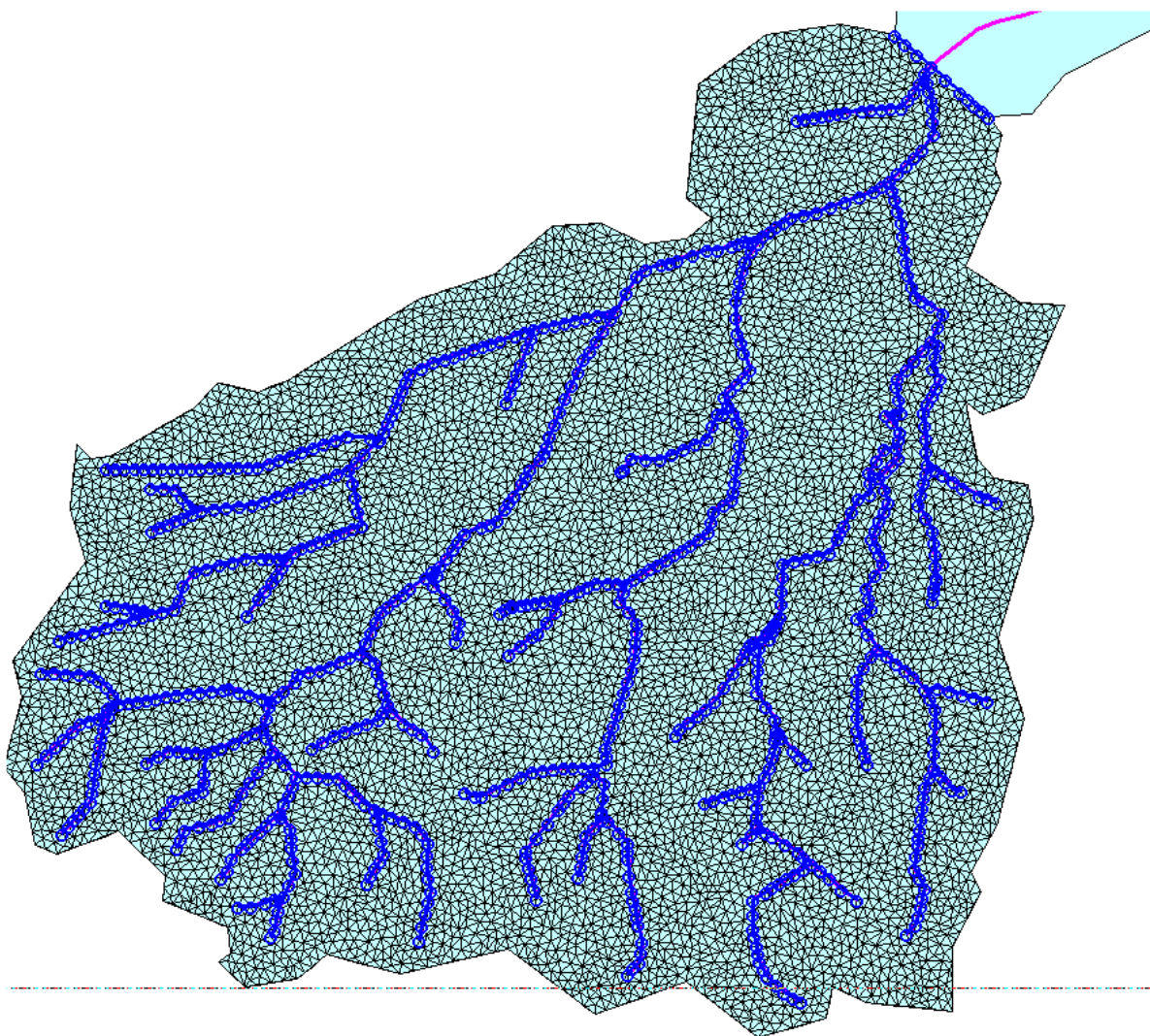
Počáteční podmínky, okrajové podmínky a další parametry definující vlastnosti toků lze zobrazit a nadefinovat v hlavním menu Flow Data.

První funkce v tomto menu, Flow initials, umožňuje přiřazování a prohlížení počátečních hydraulických podmínek. Funkce Flow boundaries umožňuje upravovat první, druhý, třetí a čtvrtý typ okrajových podmínek a nastavovat jejich omezení v samostatném podmenu. Hodnoty hydraulických parametrů lze zadat graficky buď pomocí uzlů, hranic a Rubberboxů nebo pomocí 1D a 2D databáze na základě interpolačních metod. Funkce Flow boundaries podporuje zadání okrajových podmínek pro rovnici proudění. Okrajové podmínky mohou být stacionární, nebo časově proměnné a zároveň všechny okrajové podmínky mohou být omezovány. Okrajové podmínky, které jsem pro daný model proudění podzemní vody použila, jsou:

- **Head** (první typ, Dirichletova okrajová podmínka, [m]). Tato podmínka byla zadána ve všech vrstvách v místě odtoku povrchových vod z oblasti (severovýchodní cíp

modelované oblasti) a v nejsvrchnější vrstvě také ve všech bodech povrchových toků (obr. 17).

- **Flux** (druhý typ, Neumannova okrajová podmínka, [m/d], [m<sup>2</sup>/d]): definuje průtok hranicí. Neumannova okrajová podmínka platí pouze, pokud definuji vzdálenost, na kterou by se měla vztahovat výběrem sousedních uzlů. Byla zadána ve všech vrstvách na hranici modelované oblasti, kde představuje nulový průtok hranicí. Což znamená, že do modelované oblasti voda nepřitéká, ale ani z ní neodtéká, mimo oblast severovýchodního cípu, kde byla zadána Dirichletova okrajová podmínka (viz výše).

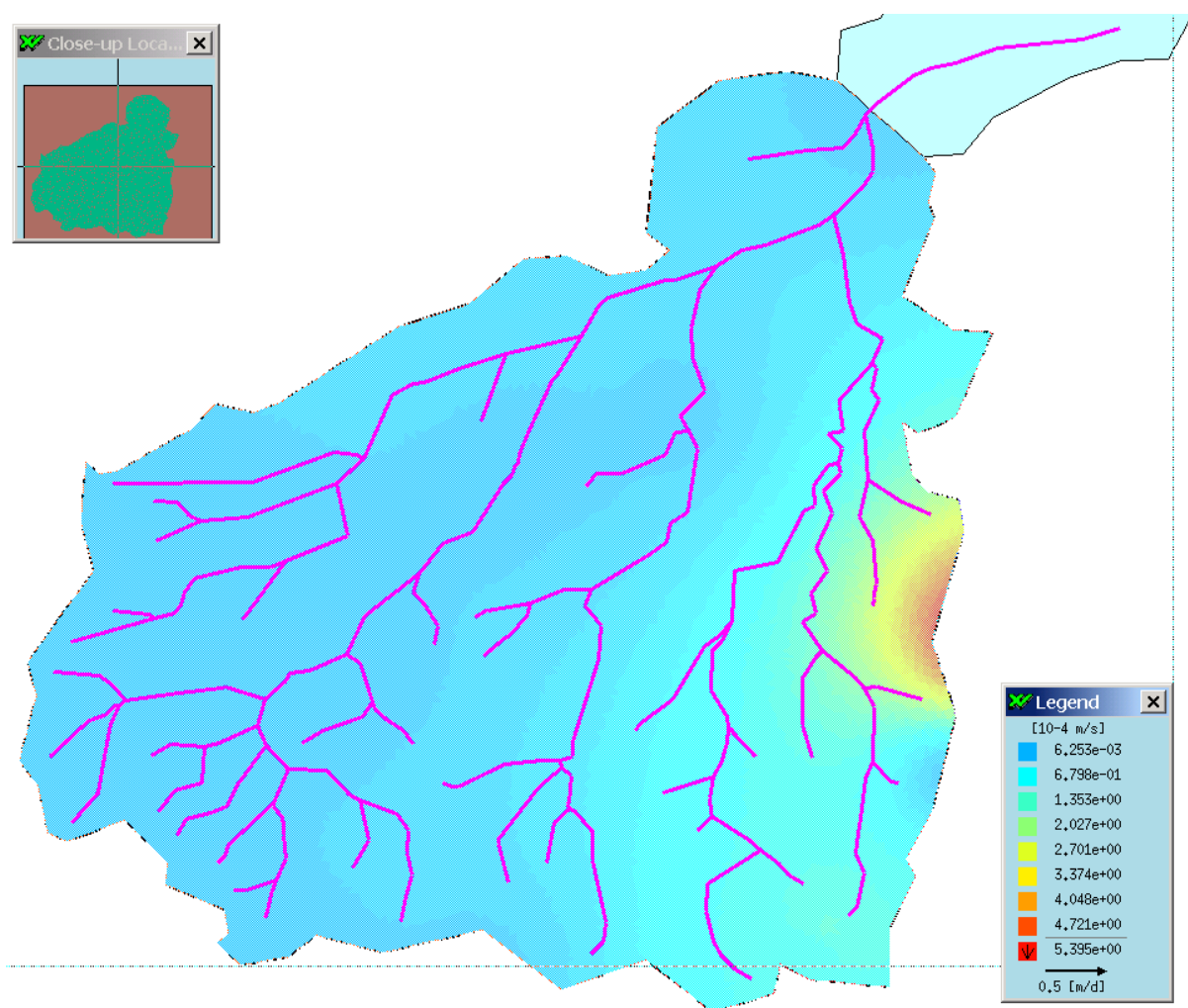


**Obrázek 17: Schéma Dirichletovy okrajové podmínky ve svrchní vrstvě oblasti**

Funkce Flow materials obsahuje okno pro editaci všech materiálových parametrů potřebných pro popis saturovaného nebo nesaturovaného prostředí. Hodnoty parametrů lze



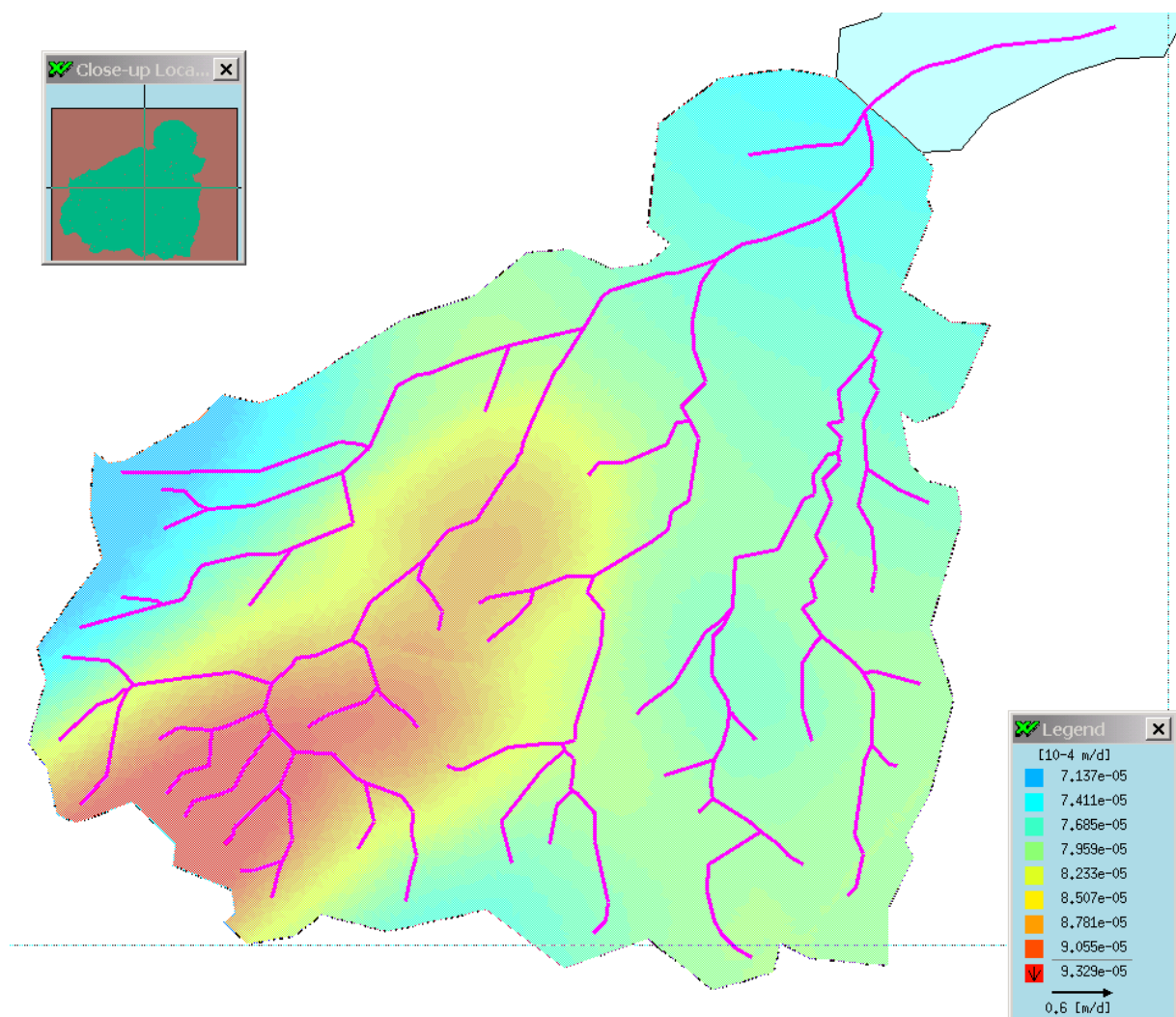
nastavit globálně nebo lokálně. Lokálně stacionární nebo časově proměnné hodnoty lze přiřadit pomocí metod kriging a Akimovy interpolace, nebo extrapolací z databáze (Diersch H. J. G., 2005). V této části byly zadány hydraulické vodivosti hornin získané z posudků nebo výpočtem. V nabídce jsem zvolila funkci, která mi umožnila vložit již předem připravené datové soubory. Tento vstupní soubor byl vytvořen pomocí aplikace Surfer10.7.972. Soubor obsahuje informaci o geografické poloze jednotlivých vrtů s příslušnou hodnotou koeficientu filtrace. Pomocí funkce Conductivity Kxx a výběrem importu datového souboru pomocí databáze byly vloženy hydraulické vodivosti hornin do všech tří vrstev (obr. 18). Předpokládám, že prostředí je izotropní.



**Obrázek 18: Schéma rozložení hydraulických vodivostí hornin**

V posledním kroku byly zadány průměrné roční srážky převzaté z posudků opět importováním datového souboru pomocí extrapolace z databáze (obr. 19). Průměrné roční

srážky převzaté z posudků zadám do modelu obdobným způsobem, jen jejich hodnoty importuji pouze do svrchní vrstvy.



Obrázek 19: Schéma rozložení průměrných ročních srážek

### 5.3.5. Simulace – řešení diskretizované úlohy

Tato část popisuje provedení, sledování a ukládání simulací proudění a transportních procesů. Po vyvolání FeFlow simulace, je spuštěn solver, který řeší soustavu lineárních rovnic získaných zvolenou metodou diskretizace úlohy. Solver dynamicky přiděluje všechna data a pracovní prostředí potřebné pro simulaci. Pokud je nedostatek paměti, objeví se okno s upozorněním a simulátor se zastaví. V opačném případě simulace pokračuje, proběhne výpočet a otevře se menu, které umožňuje ovládání postprocesoru a zobrazení jednotlivých výsledků.

Volbou příkazu Re - (Run) Simulator dojde k provedení výpočtu. Všechny hlavní výpočtové činnosti jsou popsány pomocí panelu zpráv v dolní části obrazovky. Při řešení nestacionárních problémů lze postup výpočetních kroků pozorovat na výpočetním stavovém řádku. Simulátorem se zvyšuje stávající rychlost vzorového proudění anebo hromadné lemování izolinií, kdykoli jsou k dispozici nové výsledky. Zvýšení frekvence může být omezeno nastavením počtu časových kroků mezi zvyšováním na hodnotu větší než jedna. Po každém časovém kroku, mohu simulaci přerušit. Simulátor lze snadno znovu spustit kliknutím na příkaz Re-(run) Simulator. Nové spuštění solveru je možné, i přesto, že bylo dosaženo koncového času. V tomto případě, simulátor pokračuje v posledním stupni výpočtu a automaticky zvyšuje absolutní počáteční čas. Simulátor používá automatické rozlišení, aby byl omezen počet výpočetních operací při řešení řídicích rovnic daných systémů.

Funkce Halt and view Results umožňuje prohlížení a export výsledných parametrů rozložení a rychlostí po dokončení simulace nebo při jejím přerušení. Zde si mohu výsledky zobrazit a analyzovat v dané časové úrovni.

Nástroj Fluid Flux Analyzer počítá velikost průtoku zvolenou plochou, vertikální nebo horizontální, úsekem hranice nebo bilanci jednotlivých uzlů sítě. Není určen pro kontrolu číselné přesnosti, ale spíše jako doplňkový nástroj pro hodnocení vypočítané distribuce darcyovské rychlosti. Proudění přes oblast (definovanou geometrickou část) se obvykle vypočítá rozdělením na malé části (vertikálně nebo horizontálně orientované) úseček. Integrované proudění reprezentuje normální proudění přes linii (polygon) daného segmentu. Musíme brát na vědomí, že výsledky Fluid Flux Analyzer nemusí dávat zcela přesné hodnoty proudění. K nepřesnostem může dojít, z důvodu, že:

- rychlosti jsou sekundárními výsledky simulačního běhu
- vektory rychlostí z jednotlivých uzlů jsou promítány z jednotlivých sekcí

Podstatou těchto nepřesností je to, že z relativně přesně určených výsledných hodnot hydraulické výšky dostáváme hodnoty objemové hustoty toku a hodnoty průtoku numerickým derivováním, které je zatíženo chybou aproximace. Nicméně, je to užitečný nástroj pro odhad proudění mezi podoblastmi modelované oblasti, např. proudění do otevřené jámy z okolní zvodně nebo kapaliny v průřezu (Diersch H. J. G., 2005).

## KAPITOLA 6. ZÁVĚR

Studiem dostupné publikované a archivní literatury, zjednodušením poskytnutých dat ZABAGED Českým úřadem Zeměměřičským a katastrálním a dále aktualizací dat v terénu byly získány podklady pro vytvoření koncepčního a následně matematického modelu proudění podzemní vody ve svrchní vrstvě v severní části českobrodského permokarbonského.

Vytvořením tohoto modelu bylo možné získat numerickou cestou hodnoty hydraulické výšky a následně objemové hustoty toku v modelované oblasti a porovnat je s daty získanými měřením.

### **6.1. Postup práce**

V prvním kroku tvorby diplomové práce byly prostudovány dostupné publikované a archivní materiály, které byly poté aktualizovány v terénu. Na základě těchto podkladů pak byla vytvořena rešeršní část diplomové práce.

V dalším kroku byla vybrána potřebná data z HG / IG posudků, která byla dále zpracována pro potřeby matematického modelování. Dále pak data poskytnutá Českým úřadem Zeměměřičským a katastrálním byla zjednodušena pomocí aplikace ArcGis for Desktop 10. 1. Poté byl formulován koncepční model. Na jeho základě byl v aplikaci

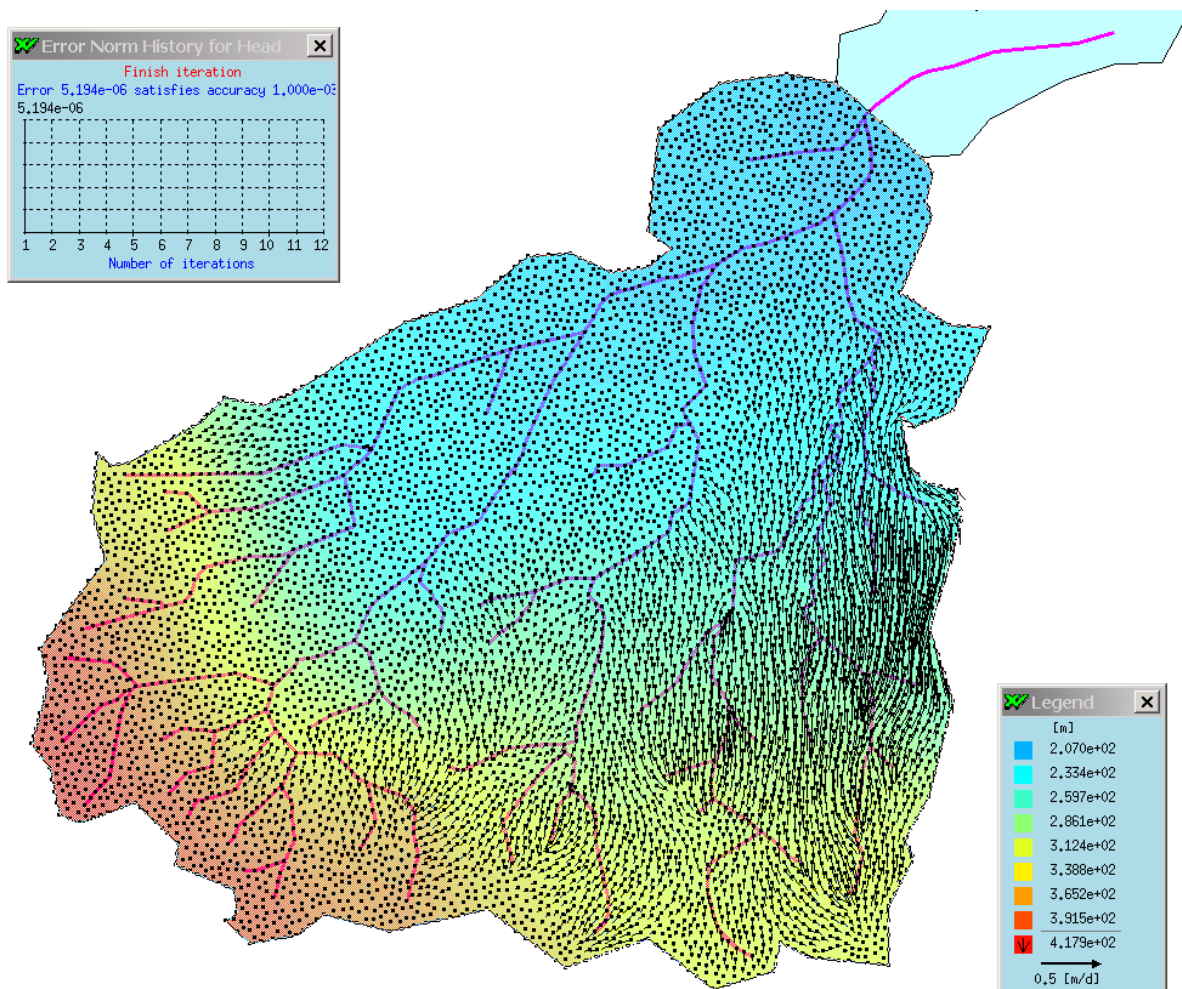
FeFlow 5. 2 vytvořen vlastní model proudění podzemní vody svrchní zvodně v severní části českobrodského permokarbonu, respektive v oblasti hydrologického povodí Horního a středního Labe, hydrologického povodí 4. řádu řeky Výrovky (HEIS.VUV.cz).

### **6.2. Výsledky**

Výsledkem matematického modelování proudění podzemní vody svrchní zvodně v severní části českobrodského permokarbonu, respektive v oblasti hydrologického povodí Horního a středního Labe, hydrologického povodí 4. řádu řeky Výrovky bylo získání kompletního datového souboru rozložení hydraulické výšky ve zkoumané třírozměrné oblasti. Z tohoto datového souboru je následně postprocesor schopen určovat další data a vytvářet požadované výstupní soubory.

Pro výsledné nastavení modelu bylo shledáno, že naměřená data (data získaná z jednotlivých posudků) dobře odpovídají vypočítaným datům pomocí matematického modelu. Vypočítaná data z matematického modelu odpovídají skutečné geomorfologii dané oblasti, množství srážek a hydraulické vodivosti hornin. Jak je vidět na obr. 20, ve východní části oblasti, kde jsou potoky ve skutečnosti málo zaklesnuté do terénu, má podzemní odtok větší význam než povrchový odtok, potoky v této části oblasti drénují minimální množství povrchových vod. Také rychlost proudění podzemní vody je zde ovlivněna zvýšenou hydraulickou vodivostí hornin a rychlost proudění podzemní vody je tedy vyšší. Z čehož opět vyplývá, že potoky drénují jen minimální množství povrchových vod.

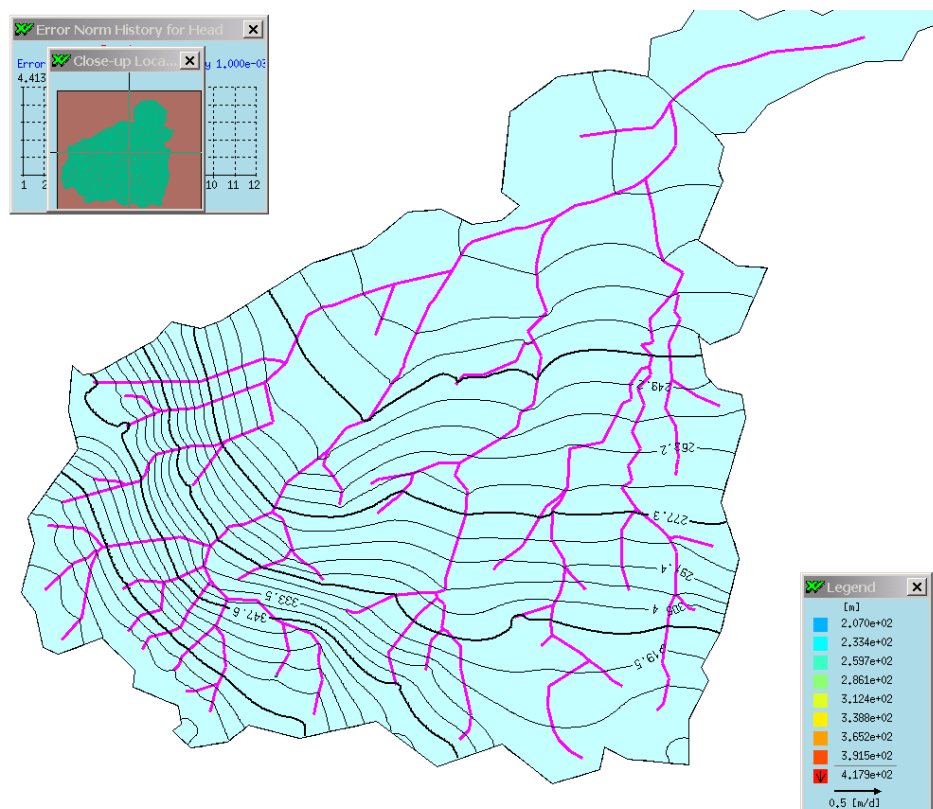




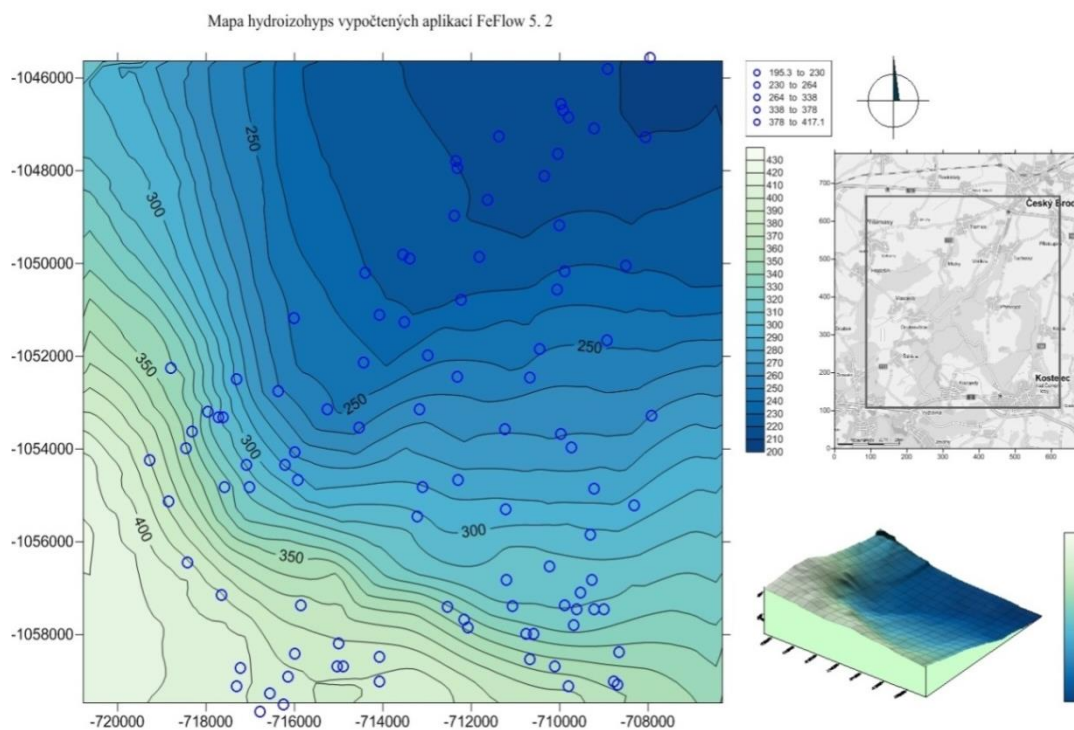
**Obrázek 20: Schéma výsledné simulace proudění podzemní vody**

Vypočtený model hydroizohyps, který udává informaci o směru proudění podzemní vody a nadmořské výšce hladiny podzemní vody (obr. 21 a 22), se dobře shoduje s původním modelem vytvořeným pouze na základě změřených piezometrických dat. Významnější rozdíly lze nalézt především v okolí jednotlivých vrtů. To je dáno tím, že data naměřená ve vrtech představují pouze lokální informaci o hydraulických parametrech podzemní vody a model vytvořený pouze na základě těchto dat nezohledňuje globální vliv piezometrických výšek ani bilanční zákonitosti.





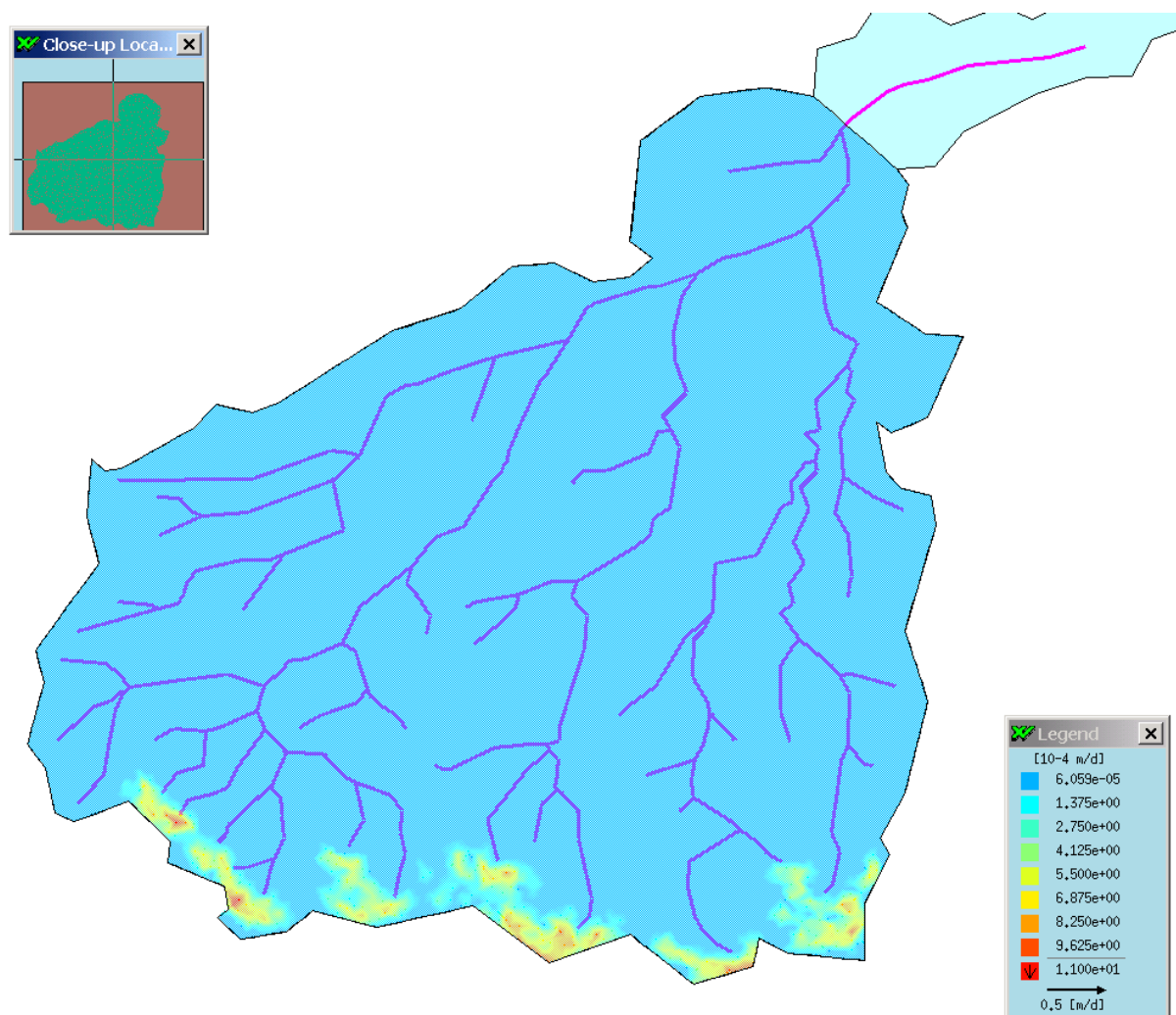
Obrázek 21: Schéma mapy hydroizohyps vypočtených v aplikaci FeFlow 5. 2



Obrázek 22: Schéma mapy hydroizohyps vypočtených v aplikaci FeFlow a upravených v aplikaci Surfer

### 6.3. Diskuse

Abych dosáhla optimálních výsledků, zvýšila jsem v západní části modelu, v nejvyšších nadmořských polohách modelované oblasti, v místech, kde jednotlivé potoky pramení, lokálně množství atmosférických srážek (obr. 23), resp. podíl infiltrované vody na předpokládané intenzitě srážek. Globálně tvoří velikost infiltrace srážkových vod třetinu veškerých atmosférických srážek. Množství lokálně přidaných srážek bylo natolik nepatrné, že v celkovém součtu atmosférických srážek se téměř neprojevily. Touto kalibrací bylo dosaženo optimálních výsledků, které řádově odpovídali naměřeným hodnotám (hodnotám převzatých z jednotlivých posudků).



Obrázek 23: Schéma lokálně zadanych srážek

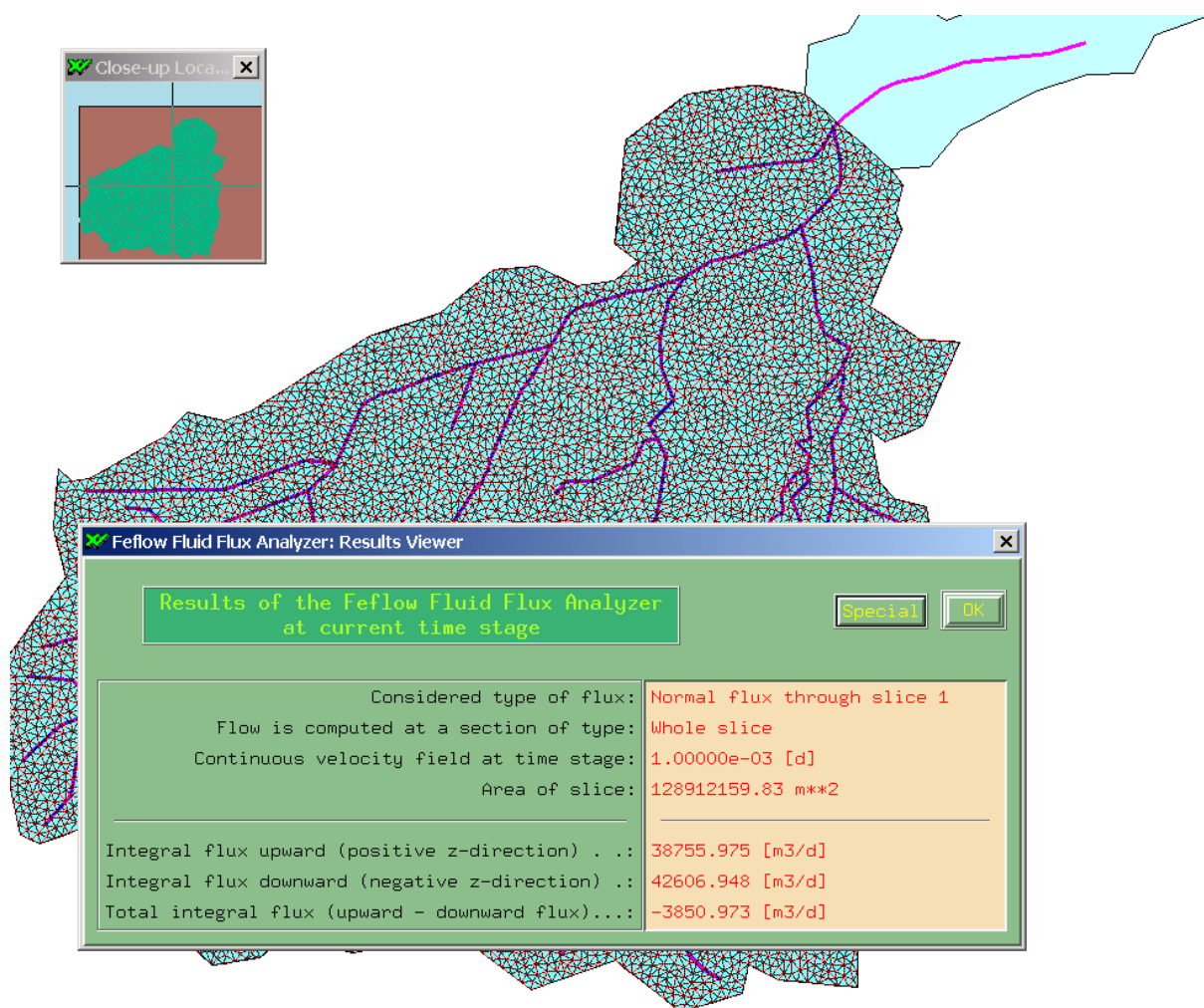
## 6.4. Závěr

### 6.4.1. Obecné zhodnocení hydrogeologie dané oblasti

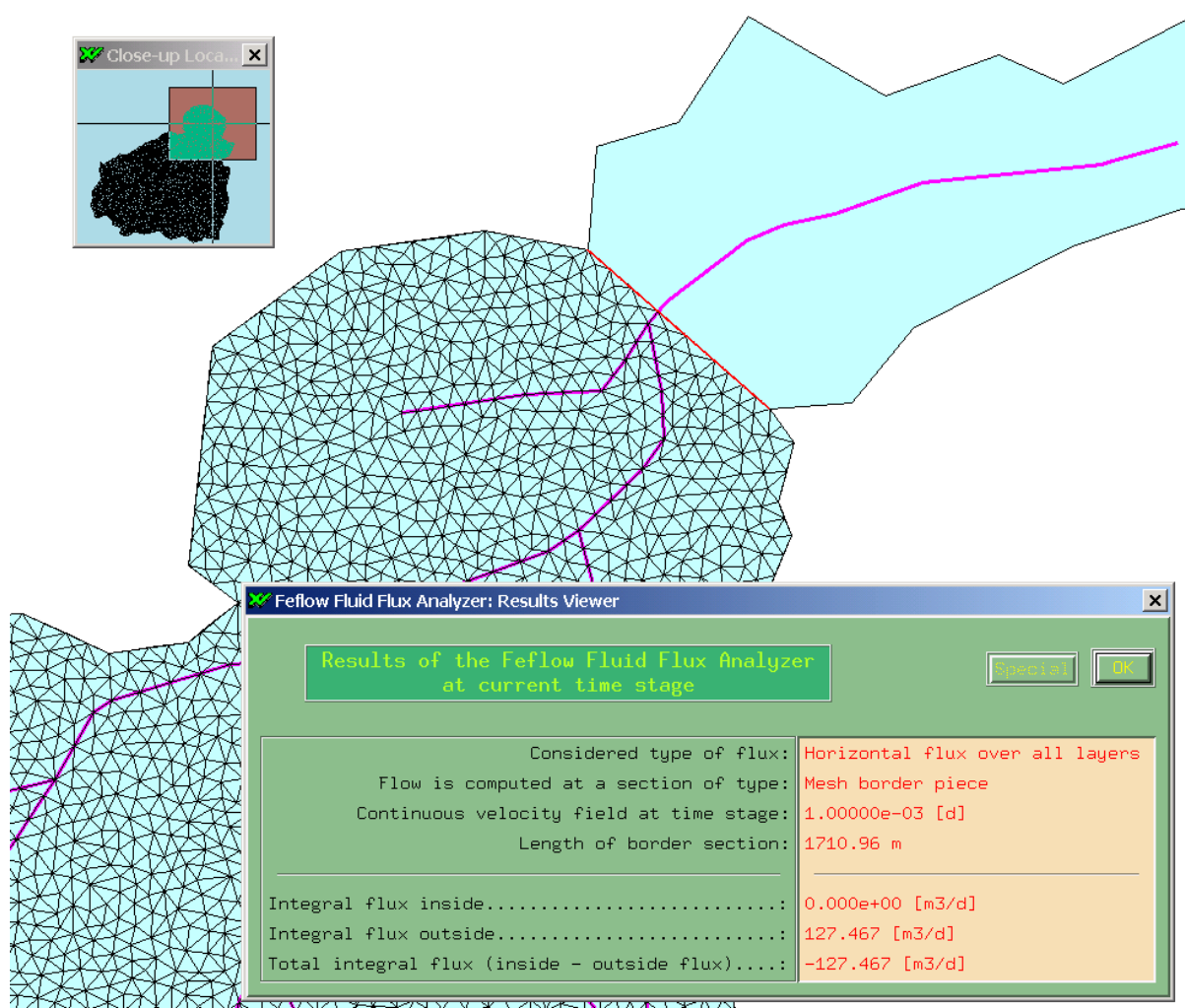
Souvrství českobrodského permokarbonu je vertikálně i horizontálně rozčleněno do řady opakujících se kolektorů (kolektor puklinově – průlinový tvoří v zájmovém území hlavní jímatelnou zvědeň a to jednak v sedimentech permokarbonu, jednak v sedimentech svrchní křídly) a izolátorů, jejichž funkce nebývá zcela jednoznačně vymezena. Ačkoliv by litologický charakter permokarbonských sedimentů mohl naznačovat převládající podíl intergranulární porózy, výsledky průzkumných prací a značná variabilita transmisivity svědčí o tom, že ve svrchních partiích rozhoduje o výši propustnosti permokarbonských hornin míra jejich rozpukání (vrty nepřilíží od sebe vzdálené vykazují velké rozdíly v čerpaném množství podzemní vody). Hladina podzemní vody bývá většinou mírně napjatá. Pokud jsou jímací objekty situovány ve výrazně tektonicky porušeném prostředí, dochází u nich většinou k silnému vzájemnému ovlivnění.

### 6.4.2. Zhodnocení celkové bilance

Celková plocha modelované severní části českobrodského permokarbonu tvoří 128 912 159 m<sup>2</sup>. Z naměřených dat (dat převzatých z jednotlivých posudků) vyplývá, že průměrná velikost atmosférických srážek s lokálně přidanými srážkami při kalibraci tvoří cca  $8,6 \times 10^{-5}$  m/den. Vynásobením atmosférických srážek celkovou plochou oblasti dostanu 11 086,5 m<sup>3</sup> srážek za den. Voda, která se v oblasti infiltruje, představuje třetinu z této hodnoty, tedy 3 695,5 m<sup>3</sup>/den. Výpočtem bilance v matematickém modelu bylo zjištěno, že veškerá voda, která v modelu představuje kladné bilance, činí 42 606,9 m<sup>3</sup>/den a voda, která představuje veškeré záporné bilance, činí 38 755,9 m<sup>3</sup>/den. Rozdíl, který představuje celkový odtok z povodí, činí 3 850,9 m<sup>3</sup>/den (obr. 24). Z toho na podzemní odtok z povodí, průtok hranicí s Dirichletovou podmínkou, připadá 127,5 m<sup>3</sup>/den vody (obr. 25). Vypočítaná infiltrace srážkových vod tedy činí 3 723 m<sup>3</sup>/den. Srovnáním naměřených dat a výsledků z matematického modelu, vidíme tedy, že se data řádově shodují.



Obrázek 24: Výpočet balance veškerých vod v modelu



Obrázek 25: Výpočet podzemního odtoku z hydrologického povodí v severním cípu modelované oblasti

#### 6.4.3. Srovnání modelů hydroizohyps

Údaje o piezometrických výškách zaznamenaných v jednotlivých vrtech v daném povodí nebyly využity při kalibraci modelu, a proto je důležité jejich srovnání s výsledným rozložením piezometrických výšek získaných matematickým modelem.

V modelu hydroizohyps, vytvořeném na základě souřadnic jednotlivých vrtů na daném území a výšek ustálených hladin podzemní vody se výrazně projevují některé jednotlivé vrty, zatímco charakter vypočtených hydroizohyps je mnohem hladší. Příčina tohoto rozdílu byla vysvětlena výše, v kapitole 6. 2. Na tomto místě je třeba uvést, že v jednotlivých bodech se obě sady dat mohou odlišovat, globálně ale dávají shodný obraz proudění. Závěrem lze tedy konstatovat, že srovnání měřených piezometrických výšek s vypočtenými hodnotami ukazuje na dobrou shodu. Mapy obou dvou modelů jsou obsaženy v příloze (příloha č. 6 a 7).



#### **6.4.4. Využití podzemních vod v českobrodském permokarbonu (Český Brod a okolí)**

Na zájmovém území, především u Českého Brodu a v jeho nejbližším okolí, se nevyskytuje žádný významný přírodní zdroj podzemní vody, podzemní voda je zde odebírána pomocí vrtů a kopaných studní v množství dostatečném pro místní zásobování. Značná variabilita transmisivity naznačuje, že v některých místech zájmového území lze pokrýt i větší nároky na využívání podzemní vody.

Na ploše 10. až 15. km od Českého Brodu je z hydrogeologických vrtů a studní, které slouží k zásobování obyvatel, odebíráno něco kolem 963 tis. m<sup>3</sup>/rok, což znamená, že podle spotřeby, která je uvedena výše v textu, nejsou vrty plně využívány. Dále na základě odhadu počtu obyvatel v místech, kde není vodovod (část obce Doubravčice, obec Tuchoraz) a na odhadu denní spotřeby na domácnost (150 - 350 l/den) činí odběr asi 9 tis. – 21 tis. m<sup>3</sup>/rok. Z toho vyplývá, že odběry podzemní vody nedosahují odhadovaným zdrojům podzemní vody a pokud bude vodovodní řad natažen i do zbývajících obcí, bude rezerva podzemní vody činit cca 651 tis.m<sup>3</sup>/rok (= 21 l/s).

#### **6.4.5. Zásady ochrany podzemních vod**

Mělké zvodně pánevního zvodněného systému jsou přístupné znečištění z povrchu nejružnějšího charakteru. Z tohoto důvodu je nezbytné chránit každý jednotlivý zdroj podzemní vody a zajistit ochranu podzemních vod před znečištěním (plánování skládek, okolí průmyslových podniků). Současně však u kolektorů s vysokou až velmi vysokou transmisivitou vystupují do popředí otázky kvantitativní. Jejich nerespektování může vést k regionálním projevům vysoušení krajiny (zapadáním hladin ve studních, zmenšování minimálních průtoků v povrchových tocích – snížení podzemní složky celkového odtoku).

Kvantitativní hledisko ochrany podzemních vod je nezbytné respektovat zejména v případě využívání bazální křídové zvodně.

Bazální křídová zvodeň by měla být hospodárně využívána pro centrální zásobování obyvatel a pro potravinářské závody, pokud to její kvalita dovoluje a pokud nedochází k jiným nežádoucím účinkům v důsledku odběru podzemní vody. Je nutné zajistit kvalitativní ochranu bazální křídové zvodně hlavně v oblastech infiltrace. Při zřejmé hydraulické spojitosti této zvodně prakticky v celé české křídové pánvi spočívá nebezpečí v tom, že znečištění, ke kterému dojde v infiltrační oblasti, se může po velmi dlouhé době projevit v území umělé nebo přírodní drenáže. Je tedy zřejmé, že jde obvykle o záležitosti s velmi dlouhodobými nepříznivými důsledky, že znečišťující produkty se mohou v kolektoru pozvolna akumulovat, aniž to bude patrné, a že tedy současný postoj k problémům ochrany podzemních vod rozhoduje o kvalitě vody, která bude čerpána v daleké budoucnosti.

Důležitá je také čistota povrchových toků, která je nezbytnou podmínkou pro případnou umělou infiltraci (Krásný et al. 1982).

## KAPITOLA 7. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

Beven K. J. (2001). *Rainfall run off modelling*. John Wiley & Sons

Blaheta R. (2012). *Matematické modelování a metoda konečných prvků*. Matematika pro inženýry 21. století. Ostrava

Císlerová M., Vogel T. (1998). *Transportní procesy*. Praha: Skriptum ČVUT

Diersch et al. (2005). *User's Manual. Wasy software FeFlow 5. 2 – Finite Element Subsurface Flow and Transport Simulation System*. Berlin

Dingman L. S. (2002). *Physical hydrology*. Prentice Hall

Havlena V. (1964). *Geologie uhelných ložisek 2*. Praha: Československá akademie věd

Holub V. et al. (1967). *Strukturní vrt NV – 1 (Nová Ves u Tábora). Závěrečná zpráva*. Praha: MS Archiv Českého geologického ústavu

Holub V. (1972). *Permian of the Bohemian Massif. In: Falke H.: Rotliegend - Essays on European Lower Permian*. Leden.

Holub V. (1982). *Explanatory Notes to the lithotectonic profile of Paleozoic molasses, 26. Blanice Furrow. (Profile and comment to Annex 26.). – Veröff. Zent. – Inst. Phys. Erde Adw DDR*. Potsdam.

Holub V. (1999). *Geologická mapa permokarbonu blanické brázdy*. Praha: Český geologický ústav

Hovorka V., Rygerová B. (2009). *Informace o přírodních zdrojích podzemních vod z okolí Českého Brodu, o vlivu těžby na kvalitu podzemní vody*. Ústní sdělení, Václav Hovorka, Ing. Barbora Rygerová, I. SčV, a.s., Cukrovarská 203, Český Brod-Liblice, Kolín.

Hrádek F., Kuřík P. (2002). *Hydrologie*. Praha: Skriptum ČZU

Jetel J. (1970). *Scheme of hydrogeochemical zoning in the Bohemian Crataceous and Permo – Carboniferous Basin*. Praha: Věstník ústřední ústav geologický

Jetel J. (1972). *Vyhledávací výzkum na černé uhlí v oblasti Mělník – Benátky nad Jizerou. Závěrečná zpráva. Hydrogeologie. Praha: MS Geofond*

Jetel J. (1974). *Hydrogeologie podloží české křídové pánve. M. Malkovský et al. - Geologie české křídové pánve a jejího podloží. Praha: Ústřední ústav geologický*

Jetel J. (1978). *Hydrogeologická terminologie (1). Praha: Hydrogeologická ročenka (1977)*

Kolman F. (1970). *Hydrogeologické poměry východní části černokosteleckého permokarbonu. Praha: Geologický průzkumník*

Kovář P. (1990). *Využití hydrologických modelů pro určování maximálních průtoků na malých povodích. Praha: VŠZ*

Krásný J. (1976). *Statistická analýza hydrogeologických dat z podkrkonošské permokarbonské pánve. Praha: Sborník geologických Věd, hydrogeologie, inženýrská geologie*

Krásný J. et al. (1982). *Vysvětlivky k základní hydrogeologické mapě ČSSR 1 : 200 000 – list 13 Hradec Králové. Praha: Ústřední ústav geologický*

Krásný J. (2007). *Analysing paleohydrogeologic and paleoclimatic development of Central Europe: a key to mineral water origin in the Bohemian Massif. In: Marques J. M., Chambel A., Ribeiro L. (eds) Proc. of the Symposium on Mineral and Thermal Waters in Hard Rock Terrains. Lisabon.*

Krásný J. et al. (2012). *Podzemní vody České republiky. Regionální hydrogeologie prostých a minerálních vod. Praha: Česká geologická služba*

Margat J. – Monition L. (1968). *Principes d'établissement d'une nomenclature des nappes souterraines. Orleáns: MS Bureauch. géol. Min.*

MF Dnes (2003). *Lidi v Brodě trápí zápach z cukrovaru. Databáze článků o životním prostředí. [www.ecomonitor.cz](http://www.ecomonitor.cz)*



Mucha I., Šestakov V. (1987). *Hydraulika podzemných vod*. Bratislava: Alfa

Pastuzsek F. (2008). *Terminologický slovník pro hydrogeology*. Praha

Pavlíková D. (2009). *Informace o pozorovacích vrtech pro sledování hladin a jakosti podzemních vod*. Ústní sdělení, Mgr. Dagmar Pavlíková- vedoucí oddělení, hydrologická bilance, Na Šabatce 2050/17, 143 00 Praha-Komořany.

Pešek J. et al. (2001). *Geologie a ložiska svrchnopaleozoických limnických pánví České republiky*. Praha: Česká geologická služba.

Pijáková H. (2009). *Informace o přírodních zdrojích podzemních vod z okolí Českého Brodu*. Ústní sdělení, Ing. Helena Pijáková, vodohospodářka, MÚ Český Brod, Budova Náměstí Arnošta z Pardubic čp. 56, 282 24 Český Brod.

Říha J. et al. (1997). *Matematické modelování hydrodynamických a disperzních jevů*. Brno: Skriptum VUT

Sine (1992). *Regionálně geologické dělení Českého masívu na území České republiky*. Praha: Čes. min. geol.

Valentová J. (1998). *Hydraulika podzemní vody*. Praha: Skriptum ČVUT

Zelinka Z. (1987). *Český Brod – Doubravčice, Závěrečné vyhodnocení hydrogeologického průzkumu*. Praha: MS Vodní zdroje

Zelinka Z. (1987). *Český Brod – Doubravčice, Zpráva o provedení poloprovazní čerpací zkoušky z vrtů BD – 1 a 2 v Doubravčicích*. Praha: MS Vodní zdroje.

1.SčV (1988,2004). *Rozbory vod*. Liblice: 1.SčV

## INTERNETOVÉ ZDROJE:

[www.ecomonitor.cz](http://www.ecomonitor.cz)

[www.geofond.cz](http://www.geofond.cz)

[www.geology.cz](http://www.geology.cz)

[www.heis.vuv.cz](http://www.heis.vuv.cz)

## PŘÍLOHY

Příloha č. 1: Mapa severní části českobrodského permokarbonu

Příloha č. 2: Mapa výsledné oblasti severní části českobrodského permokarbonu

Příloha č. 3: Mapa hydroizohyps od Sázavy ke Kouřimi

Příloha č. 4: Mapa hydroizohyps od Kouřimi ke Kounici

Příloha č. 5: Mapa hydroizohyps střední části oblasti českobrodského permokarbonu

Příloha č. 6: Mapa výsledných hydroizohyps severní části českobrodského permokarbonu

Příloha č. 7: Mapa hydroizohyps vypočtených v aplikaci FeFlow 5. 2.

## **Přílohová část**